



Neurovetenskap

Teknisk prognos

Magnus Jändel

Magnus Jändel

Neurovetenskap

Teknisk prognos

Bild/Cover: Pixtal/TT.se

Titel	Neurovetenskap – teknisk prognos
Title	Neuroscience – technology foresight
Rapportnr/Report no	FOI-R--3921--SE
Månad/Month	September
Utgivningsår/Year	2014
Antal sidor/Pages	50
ISSN	1650-1942
Kund/Customer	FMV
Forskningsområde	1. Beslutsstödssystem och informationsfusion
FoT-område	Avskanning av forskningsfronten
Projektnr/Project no	E34220
Godkänd av/Approved by	Lars Höstbeck
Ansvarig avdelning	Informations- och aerosystem

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk. All form av kopiering, översättning eller bearbetning utan medgivande är förbjuden

This work is protected under the Act on Copyright in Literary and Artistic Works (SFS 1960:729). Any form of reproduction, translation or modification without permission is prohibited.

Sammanfattning

Neurovetenskap är grundvetenskapen om hjärnan och nervsystemet. Dess främsta tillämpning är medicinsk men denna rapport är inriktad på användning för att stärka friska människors förmåga inom försvar och säkerhet. Många av dessa tillämpningar kräver noggranna etiska överväganden men vi fokuserar på vad som är och kan bli tekniskt möjligt – inte vad som är lämpligt och moraliskt riktigt. Rapporten är avsedd för läsare utan specialkunskaper men strävar ändå efter att informera om forskningsgenombrott som har skett på senare år.

Kapitel två börjar med en översikt över hur hjärnan byggs upp av neuroner, mekanismer för lärande och hur hjärnan utvecklas. Mot slutet av kapitlet presenteras en handfull nya resultat som intressant nog delvis strider mot den traditionella bilden av hjärnans struktur och funktion. Kapitel tre handlar om tre viktiga tillämpningar av neurovetenskap: att med tekniska medel koppla hjärnan till en dator för att läsa tankar, att styra med tanken och att bygga ut eller förbättra hjärnan. Neurofarmakologi, det vill säga att påverka hjärnan med droger berörs bara översiktligt. Viktiga tekniktrender är markerade med symbolen **T** och vissa av dessa som till exempel lögn-detektion är relevanta även på kort sikt.

Slutsatserna i kapitel fyra poängterar att neurovetenskapen trots stora och accelererande framsteg ännu inte erbjuder en kvantitativ förklaringsmodell för hur hjärnan fungerar och därmed skiljer sig från mogna tekniska grundvetenskaper. Kapitel tre beskriver kraftfulla interventioner för att koppla hjärnan till tekniska system och för att påverka hjärnans funktion. I frånvaro av en välgrundad förklaringsmodell kommer det dock bara i undantagsfall att vara etiskt acceptabelt att tillämpa dessa på friska människor. Riskerna är oöverskådliga och det saknas klinisk forskning som skulle göra dessa hanterbara. På 20-30 års sikt kommer storskalig kartläggning av hjärnan kombinerad med fortsatta tekniska framsteg på andra områden att ge oss en kvantitativ neurovetenskap som kan fungera som bas för framtida tekniska genombrott.

Nyckelord: Neurovetenskap, hjärnan, hjärnskanning, teknisk prognos

Summary

Neuroscience is the science of the brain and the nervous system. Its main application is medical, but this report is about enhancing healthy people's performance in defence and security applications. Many of these usages require careful ethical considerations but we focus on what is and may become technically possible - not what is appropriate and morally correct. The report is intended for readers without specialist knowledge but strives yet to inform about recent research breakthroughs.

Chapter two begins with an overview of how the brain is built from neurons, mechanisms of learning and how the brain evolves. A handful of new results that partly contradicts the textbook view are presented towards the end of the chapter. Chapter three deals with three important applications of neuroscience: brain-computer interfaces for mind reading and for mind control as well as technical means for controlling and improving the brain. Neuropharmacology is treated only superficially. Key technology trends are marked with the symbol **T** and some of these, such as lie detection are relevant also in the short term.

The conclusions in chapter four emphasizes that neuroscience, despite rapid and accelerating progress yet fails to offer a quantitative model for how the brain works, and thus differs from mature sciences on which engineering is based. Chapter three describes powerful interventions for connecting the brain to technical systems and for affecting brain function. However, in the absence of well-founded and quantitative scientific models, it will only rarely be ethically acceptable to apply these to healthy people. The risks are inestimable and we lack the clinical research that would make them manageable. In 20-30 years large-scale brain mapping combined with further technological progress in other areas will found a quantitative neuroscience that can serve as a firm basis for a wave of very significant technological breakthroughs.

Keywords: Neuroscience, brain, brain scanning, BCI, technical foresight

1	Inledning	6
2	Hjärnan och nervsystemet	7
2.1	Neuroner och neuronnät.....	7
2.2	Hjärnan och kroppen	9
2.3	Hur lär sig hjärnan?	11
2.4	Hur utvecklas hjärnan?	12
2.5	Några viktiga upptäckter de senaste åren	13
2.6	Forskningstrender och prognos	14
3	Tillämpningar av neurovetenskap	16
3.1	Hjärnor och datorer.....	16
3.2	Att läsa tankar och att styra med tanken	17
3.2.1	Instrument som läser tankar.....	17
3.2.2	Tankeläsning - forskningstrender och prognos	19
3.2.3	Tankeläsning: trender och tillämpningar	22
3.2.4	Styra med tanken - forskningstrender och prognos.....	25
3.2.5	Styra med tanken - möjliga tillämpningar	27
3.3	Bygga ut och förbättra hjärnan	27
3.3.1	Instrument som styr hjärnan.....	28
3.3.2	Metoder som kräver kirurgi	30
3.3.3	Att frigöra dolda mentala förmågor.....	32
3.3.4	Neurofarmakologi – förbättra hjärnan med droger	33
3.3.5	Hjärnträning	35
3.3.6	Bygga ut och förbättra hjärnan – forskningstrender och prognos.....	35
3.3.7	Bygga ut och förbättra hjärnan – möjliga tillämpningar	36
3.4	Systemintegrering med neurovetenskap	38
4	Slutsatser	40
5	Försvarsmaktens perspektivplan 2013	42
	Bevakningsbehov	44
6	Förkortningar	45
7	Referenser	46

1 Inledning¹

Har vi alla egentligen fotografiskt minne, absolut gehör och blixtnabb kalkyleringsförmåga? Går det att frigöra denna dolda förmåga genom att manipulera hjärnan? Det hävdar den australiske forskaren Allan Snyder och hans team vid Centre of the Mind i Sydney. Air Force Research Lab i USA har visat att bildanalytiker får upp till 25 % bättre förmåga att upptäcka mål i radarbilder om deras hjärnor stimuleras med likström. Universitetet i Washington demonstrerade år 2013 hur en persons vilja kan läsas av en hjärnskanner och via en dator och en magnetbestyckad huva tvinga en annan person att utföra den viljestyrda handlingen. Vad blir konsekvenserna av ny teknik för att läsa och styra tankar? Hur kommer vi till exempel att påverkas av den nya vågen av hjärnskanningsbaserade lögn-detektorer som redan finns på marknaden? Det är lätt att både ryckas med och skrämmas av alla möjligheter men det är viktigt att förstå att hjärnan radikalt skiljer sig från våra tekniska system vilket gör att det finns skarpa gränser för hur den kan integreras med teknik.

Människohjärnan är individens och samhällets viktigaste instrument för utveckling och överlevnad. Neurovetenskap är den grundläggande vetenskapen om hjärnan. Driven av parallell utveckling inom informationsteknik, bioteknik och sensorer pågår en explosiv utveckling inom neurovetenskap. Denna rapport sammanfattar kortfattat kunskapsläget, lyfter fram färskta genombrott och identifierar trender som kan leda till omvälvande nya tillämpningar samtidigt som vi diskuterar fundamentala begränsningar. Fokus är på teknik grundad i neurovetenskap som kan påverka friska individer, samhälle samt försvar och säkerhet. Speciellt viktiga tekniktrender markeras med symbolerna **T1**, **T2** ...

Neurovetenskap handlar om hjärnan och nervsystemet sett som ett biologiskt system och är därmed avgränsad från beteendevetenskaper som psykologi och sociologi. I denna rapport fokuserar vi på neurovetenskap i egentlig mening och speciellt på hur tekniska system direkt kan läsa av och styra hjärnan utan att kommunicera via våra vanliga sinnen. För att hålla detta fokus och begränsa omfattningen av rapporten avstår vi från att beskriva flera viktiga aspekter av neurovetenskap inklusive medicinska tillämpningar, nervsystemet utanför hjärnan och detaljer i hjärnans anatomi. Utveckling av droger som påverkar hjärnan berör vi bara perifert. Neurovetenskap inspirerar och inspireras av datorvetenskap och då speciellt artificiell intelligens (AI). Eftersom AI behandlas i en separat rapport i 2014 års tekniska prognos (Gisslén, 2014) behandlar vi här detta ämne ytterst kortfattat. Tillämpningar av neurovetenskap berör ofta våra mest centrala värden och därför är etik en central del av varje diskussion om neurovetenskap. På grund av utrymmes- och kompetensbrist kommer dock denna rapport inte att omfatta etik.

¹ Referenser till alla resultat som diskuteras i detta avsnitt kommer senare i denna rapport.

2 Hjärnan och nervsystemet²

2.1 Neuroner och neuronnät

Hjärnan är väsentligen ett nätverk av *neuroner*. Dessa är biologiska celler som är specialiserade för att processa och kommunicera information. Bild 1 visar hur en neuron är uppbyggd. Till cellkärnan ansluter ett system för insignal och ett system för utsignal. Insignal-systemet består av en mängd trådar som kallas *dendrit*er och hela insignal-systemet kallas därför ett *dendritträd*. Utsignal-systemet består av en lång tråd som kallas en *axon*. I slutet av axonen bildas ofta ett axonträd där den utgående signalen fördelas i ett grenverk av trådar. Med ett samlingsnamn kallas alla trådar i dendrit- och axonträd för *neuriter*.

Neuronen behandlar och transporterar elektriska signaler. Insignalen i varje dendrit varierar beroende på hur dendriten stimuleras utifrån. Neuronen summerar insignalerna från hela dendritträdet. Om summan överstiger ett tröskelvärde utlöses en serie av signalpulser i axonen. Dessa pulser är digitala med en konstant signalstyrka som inte beror på hur mycket dendritträdets signal överstiger tröskelvärdet. Neuronens huvudsakliga funktion är alltså att beroende på insignal ta beslut om en standardiserad utsignal ska sändas eller inte. Om neuronerna sänder en utsignal på sin axon säger man att neuronerna är *aktiv*.

Axoner och dendritter är tätt packade i hjärnan men har inte signalkontakt med varandra om det inte finns en speciell kopplingspunkt som kallas en *synaps* (se bild 2). En synaps kopplar en axontråd till en dendrittråd så att en signalpuls i axonen orsakar en elektrisk puls i dendriten. I en typisk synaps är det kemiska signalsubstanser som utgör själva kopplingen. På axonsidan leder axonens elektriska puls till att kemiska signalämnen släpps ut. Dessa sprids över det korta vätskefyllda gapet mellan axon och dendrit och tas emot av sensorer som är specialiserade på att känna igen axonens kemiska signal. Signalämnets molekyler passar i dendritens sensor som en nyckel i ett lås. Antalet signalmolekyler som fångas av sensorerna styr hur stark elektrisk signal som utlöses i dendriten. Det finns hundratals typer av signalsubstanser men varje synaps använder bara en eller ett fåtal av dessa.

² Detta kapitel sammanfattar grundkunskaper inom neurovetenskap men anger inte vetenskapliga referenser utom i fall då resultaten är nya eller inte finns i de vanligaste läroböckerna. Läroböcker inom neurovetenskap rekommenderas i den ämnesguide som ingår i 2014 års tekniska prognos.

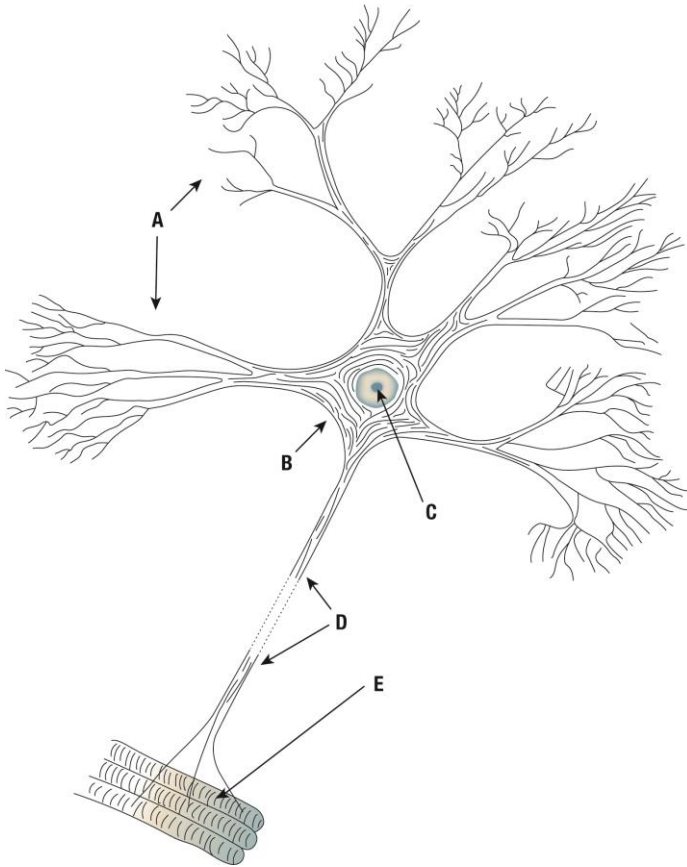


Bild 1. En neuron med dendrit(A), cellkärna(B), DNA(C) och en axon(D) som i detta fall ansluter till en muskel(E).

Den kemiska kopplingen i typiska synapser är långsam men har fördelen att signalen från axonen kan förstärkas eller försvagas när den överförs till dendriten vilket som vi ska se är viktigt för hjärnans lärande. Det finns även synapser med direkt elektrisk koppling. Fördröjningen i dessa är mycket kortare än för kemiska synapser men förstärkningsmekanismen saknas. Typiskt finns elektriska synapser därför i kretsar som förmedlar snabba reflexer och därför kräver minimal fördröjning.

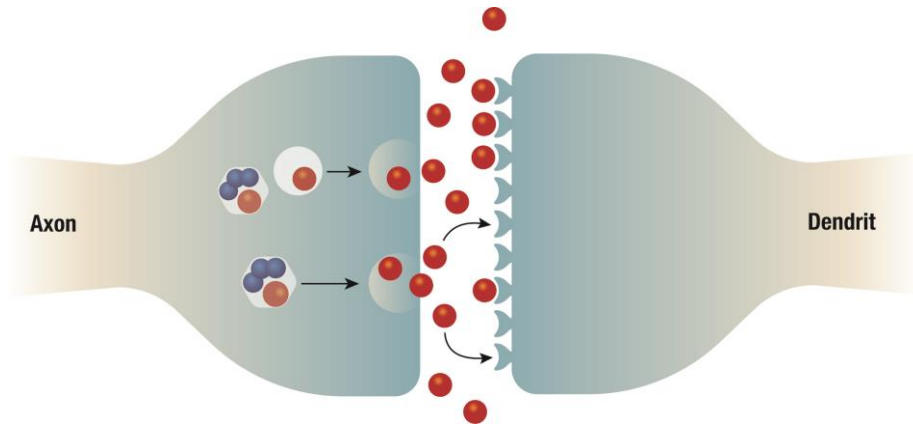


Bild 2. En synaps där signalmolekyler från axonsidan tas emot av sensorer på dendritsidan och därmed förmedlar en signal.

Signalen i en axon transporteras med en hastighet på 1-100 meter per sekund och en neuron kan aktiveras med en frekvens på högst 1 MHz. Både beträffande signalhastighet och processorhastighet är modern elektronik minst en miljon gånger snabbare. Cellkärnan i en neuron är ungefär 10 mikrometer stor, axoner och dendritter är någon mikrometer tjocka men axoner kan bli flera meter långa. En neuron kan ha tiotusentals synapser fördelade över tusentals neuriter. Hjärnan har ungefär 100 miljarder neuroner och 100.000 miljarder (10^{14}) synapser. En modern mikroprocessor har ungefär en miljard transistorer med mycket glesare sammankoppling än i hjärnan.

2.2 Hjärnan och kroppen

Vårt nervsystem kan beskrivas på olika nivåer vilket gör att neurovetenskap har många grenar och aspekter. Molekylär neurovetenskap handlar om hur neuroner och synapser fungerar på molekylnivå. I kognitiv neurovetenskap relateras hjärnans funktioner till beteende vilket gör att denna del av neurovetenskapen gränsar till psykologi. Viktiga aspekter av neurovetenskap är relationen till sinnesorganen (perception) och muskler (motorik) vilket här beskrivs mycket översiktligt.

Dendritter och axoner används för att koppla upp hjärnan mot sinnesorganen och mot kroppens muskler. I våra sinnesorgan finns specialiserade system av nervceller som tar emot information från omvärlden och i tjocka knippen av axoner skickar kodad sensordata in i hjärnan. En *nerv* är ett knippe av axoner. I

ögat finns till exempel ljuskänsliga celler som via synnerven kommunicerar med dendriter i de neuroner som processar visuell information. Det finns inre sinnesorgan som läser av tillståndet i den egna kroppen och håller hjärnan informerad. Sensorer i våra fingertoppar läser till exempel av trycket mot huden när vi griper ett verktyg vilket hjälper hjärnan att styra hur vi utför en uppgift.

Neuroner i hjärnan styr kroppen genom långa axoner som kopplar till muskler och organ. Därmed kan hjärnan kontrollera rörelser, tal, hjärtat, matsmältning och många andra av kroppens funktioner. Förutom den elektriska signaleringen mellan hjärnan och kroppen används även kemiska signaler som till exempel hormoner. Axonsignaler går från en specifik cell till en annan men kemiska signaler sprider sig via blodomloppet och kan därför ha en bred påverkan på en stor mängd celler i kroppen. På samma sätt kan kroppens kemiska signaler i vissa fall påverka hjärnan.

Hjärnan indelas ofta i moduler eller områden där vissa moduler anses ha en specifik funktion. Det finns till exempel ett område som kallas motoriska facialiskärnan som styr ansiktets muskler. För att förenkla den fortsatta framställningen kommer vi inte att ange de anatomiska namnen på de hjärnmoduler som diskuteras utan bara referera till deras funktion. Exakt var i hjärnan modulerna finns och deras vetenskapliga namn har ingen betydelse för den övergripande förståelse som vi här försöker förmedla.

Det är dock viktigt att förstå att hjärnans funktionella områden ofta inte är så väldefinierade som det ibland framställs i förenklade kartor över hjärnan. Nyligen upptäcktes till exempel att de delar av hjärnan som brukar betraktas som reserverade för synen även processar signaler från öronen (Vetter, Smith och Muckli, 2014). Överlappande funktionalitet av denna typ är troligen viktiga för att vi ska uppleva en enhetlig verklighet i stället för fragmenterade kanaler från olika sinnen. Hjärnan är inte ett modulariserat tekniskt styrsystem utan ett nätverk av neuroner där det finns ett visst mått av organisation men där funktioner ofta överlappar, samma område har flera uppgifter och det finns mängder av genvägar för att kompensera för neuronernas långsamhet. Vi blinkar till exempel inom 0.1 sekund när en insekt flyger in i ögat³. Eftersom det är viktigt att snabbt skydda ögat har evolutionen byggt en genväg där axoner från ögat via en mellanstation djupt inne i hjärnan utlöser de muskler som utför blinkningen. Medvetna viljestyrda blinkningar hanteras av andra delar av hjärnan och är mycket långsammare. Det är mer regel än undantag att hjärnan har alternativa vägar för tidskritiska funktioner. En annan viktig aspekt av hjärnans struktur är att det finns mycket feedback-signaler från högre hierarkiska nivåer till lägre nivåer och ända ner till sinnesorganen. Information flödar från sinnena och processas till högre och mer abstrakta representationer på olika nivåer men förväntningar och förutsägelser på högre nivåer strömmar också nedåt, styr hur

³ <http://teachneuro.blogspot.se/2013/01/the-corneal-or-blink-reflex.html>

data behandlas på lägre nivåer och ser till att vad sinnena uppfattar och prioriterar beror på vår situation och våra förväntningar.

2.3 Hur lär sig hjärnan?

Hjärnan lär sig genom hela livet och förändras därmed ständigt. Det finns fyra grundläggande mekanismer för inläring i hjärnan som mycket översiktligt beskrivs i de följande fyra styckena.

Styrkan i synapser anpassas. Om signalen från en neuron bidrar till att en annan neuron aktiveras kan kopplingsstyrkan i de synapser som kopplar den första neuronerna till den andra öka. Nästa gång den första neuronerna aktiveras sprids då aktiveringen lättare till den andra neuronerna. För varje gång hjärnan genomför ett aktiveringsmönster stärks de synapser som bidrar så att det för varje upprepning blir lättare att utföra mönstret.

Synapser uppstår och försvinner. Om det inte redan finns en synaps mellan två neuroner finns det ju ingen synapsstyrka att anpassa. Hur vet hjärnan vilka neuroner som behöver kopplas ihop? Det vet inte forskarna än men en vanlig teori om hur detta går till kallas *neural Darwinism*. Enligt denna bildas synapser slumpmässigt mellan näraliggande axontrådar och dendriter. Synapser som är för svaga och därmed inte har någon effekt förtvinar och försvinner. Hjärnans aktivitetsmönster avgör därför var överlevande synapser uppstår.

Neuriter bildas och försvinner. Neuronernas dendrit- och axonträd ändras genom att neuriter (trådar) skapas och försvinner. Enligt neural Darwinism sker nybildning slumpmässigt medan neuriter med få aktiva synapser tillbakabildas. En ny neurit gör att neuroner som tidigare inte haft möjlighet att få kontakt nu på försök kan bilda synapser. Om dessa synapser används i hjärnans aktivitetsmönster kommer det att förstärkas och därmed kommer den nya neuriten att bli kvar. När vi lär oss nya aktivitetsmönster kan därför nya neuriter bildas men om vi slutar med en aktivitet kan neuriter försvinna.

Neuroner föds och dör. Nya neuroner kan bildas från reservoarer av stamceller. Genom att följa kemiska spår i hjärnan söker sig dessa celler fram till den plats där de kommer att växa och skickar ut sin långa axon som också den följer kemiska spår. Den nya neuronerna bildar axon- och dendritträd och kopplar upp sig mot andra neuroner. I den vuxna hjärnan är det troligen bara ett fåtal områden som tar emot nya neuroner, däribland områden som är viktiga för att skapa nya långtidsminnen. Omfattningen av neuronbildning och vilken roll den har i lärandet är för närvarande osäker och kontroversiell inom forskarsamfundet.

Tillsammans gör dessa mekanismer att hjärnan kan förändras under intryck av erfarenheter. Man brukar säga att hjärnan är plastisk.

2.4 Hur utvecklas hjärnan?

Hjärnans förmåga till inläring styrs av kemiska signalämnen enligt inbyggda program. Hög plasticitet är inte bara till nytta eftersom minnen glöms och förmågor vittrar bort när mönstret av synapser, neuriter och neuronerna ändras. I olika faser av livet och beroende på livsstil har människan olika balans mellan plasticitet och stabilitet. Barnets hjärna är mer plastisk och den vuxna hjärnan är mer stabil eftersom barnet har mycket att lära sig och den vuxne har kunskaper och färdigheter som måste bevaras. Fysisk träning ökar den vuxna hjärnans plasticitet vilket kan vara en anpassning till att fysisk aktivitet under evolutionens lopp har varit kopplade till utmaningar som även kräver tänkande och lärande.

Det nyfödda barnets hjärna har i stort sett samma antal neuronerna som den vuxna hjärnan. Spädbarnets hjärna växer genom att mängder av neuriter och synapser bildas. Under inflytande av erfarenheter stabiliseras en del av dessa medan andra försvinner. Den vuxna hjärnan har betydligt färre neuriter och synapser än det två-åriga barnets hjärna. Spädbarnstiden är för hjärnan en tid av intensivt experimenterande då erfarenheten mejslar ut vilka kretsar och aktivitetsmönster som behövs. Olika funktioner har specifika utvecklingsfaser då "fönster" av ökad plasticitet öppnas. Vissa funktioner utvecklas aldrig om de inte aktiveras under denna tid. Djurförsök visar till exempel att synen inte utvecklas som den ska om det unga djuret aldrig ser ljus. Den nyfödda hjärnan har potential för att lära sig att se men det är bara genom aktivt lärande som fungerande syn utvecklas.

I äldre litteratur och i det allmänna medvetandet finns föreställningen att den vuxna hjärnan är stel och i ständig utförsbacke. På senare år har vi lärt oss att även den vuxna hjärnan är mycket plastisk och att även friska åldringar har stor förmåga till lärande. En vuxen hjärna behöver emellertid både stabilitet och plasticitet. Vi vill till exempel inte att förmågan att se på långa avstånd ska tillbakabildas om vi under några månader vistas i en ubåt. Evolutionen har därför försett vuxna hjärnor med funktioner som bromsar plasticitet. Dessa bromsfunktioner omfattar både mekaniska hinder för bildandet av neuriter och en kemisk miljö som begränsar lärandet. Hjärnans utveckling begränsas också av brist på fysiskt utrymme. Neuronerna är tätt packade i hjärnan och en stor del av hjärnans volym upptas av axonknippen för långväga kommunikation. Den vuxna hjärnan är plastisk men det finns inte plats för väsentligt fler neuronerna, synapser eller långväga axoner.

Alla hjärnor är olika dels för att varje människa har en unik uppsättning gener och dels för att hjärnan utvecklas dynamiskt under inflytande av erfarenheter och livsstil. Detta gör att hjärnan på ett fundamentalt sätt skiljer sig från datorsystem.

2.5 Några viktiga upptäckter de senaste åren

Beskrivningen av hur hjärnan fungerar i avsnitten 2.1-2.4 skulle kunna vara skriven för tio år sedan. De senaste årens forskning har dock tillfört kunskap även om fundamentala aspekter av hjärnans funktion och flera viktiga genombrott har skett det senaste året. Nya mättekniker och bättre möjligheter att analysera stora mängder data är drivande faktorer i den snabba kunskapsutvecklingen.

Dendriter beskrivs i läroböcker som passiva kanaler vilka transporterar signaler från synapser till den centrala summerande funktionen som avgör om axonen ska aktiveras eller inte. År 2013 upptäckte dock en grupp Stanfordsforskare (Smith m. fl., 2013) att dendriter i mushjärnan aktivt utför beräkningar och initierar signaler. Detta betyder att varje sådan aktiv dendrit uppträder som en minineuron som summerar inkommande signaler och om dessa överskrider ett tröskelvärde utlöses en utgående signal. Brunel, Hakim och Richardson (2014) sammanfattar ny kunskap om hur neuroner kan utföra mycket mer komplexa beräkningar än vi tidigare har trott.

En upptäckt från 2010 visar också att naturen inte helt följer läroböckernas vanliga beskrivning av hur däggdjurs neuroner fungerar (Sheffield m.fl., 2010). Sheffield och medarbetare fann att axoners neurit-träd självständigt kan initiera signaler och att dessa ibland utlöser långvarig aktivering av neuronerna. Detta strider mot den vanliga bilden av att det är signaler utifrån som via dendriterna aktiverar neuronerna och att axonen enbart är en transportkanal för utgående signaler.

Den vuxna hjärnans begränsade förmåga att från stamceller skapa nya neuroner hämmar läkningen av hjärnskador och delvis också förmågan att lära och utvecklas. Även om en viss generering av stamceller förekommer även hos vuxna är det av stor betydelse att en grupp forskare från University of Texas har visat att gliaceller kan omvandlas till neuroner i en levande hjärna (Niu m.fl., 2014). Gliaceller är celler som i stort antal finns i hjärnan och som man tidigare har trott bidrar framförallt med mekanisk struktur och näringstillförsel. En annan överraskning relaterad till gliaceller är upptäckten av ett tidigare okänt system för att transportera bort avfall från hjärnan (Ilyff m. fl., 2012). En sorts gliaceller som kallas för astrocyter bildar ett transportsystem som tar bort oönskade proteiner.

I juni 2014 rapporterade Paez-Gonzalez m.fl. (2014) upptäckten av ett system i mushjärnor där vissa neuroner har förmågan att styra stamceller i hjärnan och därmed utlösa nybildning av neuroner. Därmed skulle hjärnan ha den bland informationssystem unika förmågan att mjukvaran kan bygga ut hårdvaran. När

forskarna i framtiden har kartlagt dessa system kan det öppna dramatiska möjligheter att läka skador och även förbättra friska hjärnor.

En forskargrupp från MIT har visat att medveten förståelse av innehållet i bilder kan uppstå mycket fortare än på den tiondels sekund som man tidigare har trott (Potter m.fl. , 2014). Försökspersoner kan tränas till att uppfatta innehållet i bilder som visas under så kort tid som 13 millisekunder. Detta tyder på att hjärnan har en tidigare okänd ultrasnabb genväg för signalering av åtminstone vissa visuella data eller att många bilder kan lagras för senare behandling.

Under senare år har det upptäckts att glömska är en aktiv förmåga som kontrolleras genetiskt och alltså inte bara handlar om överskrivning av information som kodats i synapser eller gradvis förfall på grund av celledöd (Rudenko, 2013).

2.6 Forskningstrender och prognos

En dominerande trend i neurovetenskap är storskalig övergripande kartläggning av hjärnan. Denna metod har inom livsvetenskaperna tidigare varit framgångsrik till exempel genom beskrivning av hela genuppsättningen för många olika arter och den pågående kartläggningen av alla människans proteiner. Denna utveckling möjliggörs av visionär forskningsfinansiering, att bildskapande instrument blir billigare och får högre upplösning samtidigt som kartläggningen automatiseras och modern informationsteknik gör att stora datamängder kan lagras och effektivt avsökas. Ett nyckelord i detta sammanhang är *connectomet* vilket betyder hela kopplingsschemat för hjärnan inklusive en beskrivning av alla neuroner, dendriter, axoner och synapser. Man har redan kartlagt hela Connectomet för en rundmask som kallas *Caenorhabditis elegans*. Det amerikanska *Human Connectome Project* är trots namnet begränsat till att kartlägga de stora axonknippen som förbinder hjärnans viktigaste regioner. Detta initiativ möjliggörs av en ny mäteteknik (dMRI) som avbildar isoleringsmaterialet kring långväga axoner och därför är lämplig för att skapa en bild av hjärnans övergripande kopplingsschema. På många års sikt skulle hela Connectomet för människan kunna kartläggas vilket skulle förvandla neurovetenskap till en informationsvetenskap där kvantitativa hypoteser kan testas i detaljerade simuleringar och där neurovetenskap och artificiell intelligens kan lära av varandra i allt högre utsträckning. Den storskaliga kartläggningen i neurovetenskap växelverkar med och förstärks av andra storskaliga kartläggningar speciellt av människans gener och proteiner. Med kunskap om hur gener påverkar viktiga proteiner och därmed neuroner, signalsubstanter, utveckling och plasticitet ökar neurovetenskapens förmåga att i detalj förstå hjärnan vilket i sin tur kommer att möjliggöra många nya tillämpningar. Med anledning av hjärnans stora komplexitet tror vi att det kommer att ta 10-20 år innan den storskaliga kartläggningen och tätare kopplingen till informations-

vetenskaper ger avtryck i form av dramatiska nya tillämpningar utanför det rent medicinska området.

3 Tillämpningar av neurovetenskap

I detta avsnitt beskriver vi tillämpningar som är mer eller mindre etiskt kontroversiella. I detta spektrum ingår mycket kontroversiella aktiviteter som tankeläsning mot offrets vilja, tveksamma tillämpningar som att övervaka operatörers mentala prestationsnivå och harmlösa funktioner som när människor frivilligt väljer att styra utrustning med tanken. Eftersom detta är en prognos av vad som kan bli tekniskt möjligt och inte en rekommendation av vad som är lämpligt gör vi i det följande inget urval av tekniska möjligheter på etiska grunder. Det bör noteras att denna rapport enbart är grundad i litteraturstudier. FOI bedriver inte forskning och utveckling inom de tillämpningar som beskrivs här.

3.1 Hjärnor och datorer

Många moderna tillämpningar av neurovetenskap går ut på att man kopplar samman en hjärna med en dator. Detta försvåras kraftigt av att en hjärna till skillnad från en dator inte är konstruerad enligt ett fast schema eller använder standardiserade koder för information och kommunikation. Som vi har beskrivit i kapitel 2 utvecklas varje hjärna individuellt i samspel med omgivningen vilket gör att både struktur och koder i någon mån är speciella för varje hjärna. Varje individuell hjärna är dessutom föränderlig över tiden på olika tidsskalor på grund av lärande, dygnsrytmen, tankar och vilja. En framgångsrik sammankoppling av dator och hjärna måste därför bygga på att man först etablerar fysisk kommunikation följt av att systemet dator-hjärna lär sig att använda uppkopplingen. Detta kan ske genom att hjärnan lär sig tolka datorns signaler eller att datorn lär sig tolka hjärnans signaler eller både och. För att bevara systemets effektivitet måste dessutom inläring ske kontinuerligt för att anpassa sig till hjärnans och omvärldens ständiga utveckling.

Vår ökade insikt om hjärnans plasticitet även hos vuxna innebär att det framstår som mer och mer möjligt att låta hjärnan lära sig att hantera nya typer av direkta gränssnitt mot teknisk utrustning. Det är dock viktigt att notera att plastisk anpassning kan innebära problem bland annat eftersom neurala resurser som används för en ny förmåga troligen gjorde något innan inläringen skedde. Det finns till exempel neurologiska symptom som främst drabbar musiker och som tros orsakas av hjärnans anpassning till överdriven träning av vissa rörelsemönster⁴.

⁴ <http://www.dystonia.org.uk/index.php/about-dystonia/types-of-dystonia/focal-hand-dystonia/musicians-dystonia-musicians-cramp>

3.2 Att läsa tankar och att styra med tanken

Att med sensorer läsa av hjärnans tillstånd kallas *hjärnskanning* vilket kan användas för att för att övervaka en persons medvetna eller omedvetna tankar. Motiv till att övervaka en persons hjärna i stället för att kommunicera med personen på vanligt sätt kan vara att 1) läsa tankar utan personens vetskap eller godkännande 2) läsa omedvetna tankar 3) minska personens arbetsbelastning. Utrustning för att styra med tanken är samma som den som läser tanken utom att den utlästa informationen via en dator används för att styra teknisk utrustning. Den främsta tillämpningen av detta är för att hjälpa människor med skador och handikapp. Motiv till att friska människor använder hjärnskannings för att styra utrustning i stället för att styra på vanligt sätt kan vara att 1) minska reaktionstiden 2) frigöra händer och röst för andra uppgifter 3) få tillgång till omedvetna tankar.

3.2.1 Instrument som läser tankar

I detta avsnitt fokuserar vi på instrument som utan kirurgiska ingrepp kan användas på levande hjärnor. Vi väljer tekniker som är eller kan bli någorlunda portabla det vill säga skulle kunna installeras i en träningsmiljö, ett fordon eller i en hjälm. Vi utelämnar medicinska tillämpningar (att lindra och bota sjuka) och instrument som främst är intressanta för forskning. Vi noterar även att det förutom hjärnskanning som diskuteras här finns alternativa eller kompletterande tekniker för att övervaka människors mentala tillstånd inklusive att mäta hjärtfrekvens, ögonrörelser, pupillstorlek och spänningar i ansiktsmuskler. Många av dessa tekniker är mogenare, billigare och effektivare än hjärnskanning.

EEG. Elektroencefalografi innebär att elektroder som fästs på huvudet mäter hjärnans elektriska aktivitet. Eftersom neuroner kommunicerar med elektriska signaler kan den sammanlagda effekten av många neuroner bli ett elektriskt fält som går att läsa av utanpå skallen. EEG har mycket bra upplösning i tiden (kan skilja på olika signaler under korta tidsintervall) men mycket dålig upplösning i rummet (har svårt att skilja på signaler från näraliggande området i hjärnan). Med EEG kan man övervaka hjärnans övergripande tillstånd som till exempel stress och avslappning, sömn och vakenhet samt uppmärksamhetsnivå. Man har hittat ett antal händelse-relaterade signaler⁵ (ERP) som indikerar specifika hjärnaktiviteter och som kan vara relativt stabila över tiden och mellan personer. Den händelse-relaterade signalen P300 är till exempel kopplad till beslutsfattande och uppmärksamhet. Bäst resultat fås med elektroder som sätts fast i hårbotten med en speciell kontaktgel. Enklare EEG-utrustning som säljs till konsumenterna⁶ är lättare att sätta på men ger mycket sämre resultat och har därför

⁵ Event-related potential (ERP)

⁶ <http://emotiv.co/>

inte fått något större genomslag på marknaden. Ett Kickstarter-finansierat projekt⁷ utvecklar OpenBCI som kombinerar en standardiserad hårdvaruplattform med öppen källkod i syfte att utveckla ett flexibelt öppet system för EEG.

MEG. Magnetoencefalografi mäter magnetfält som genereras av neuroners elektromagnetiska aktivitet. Både upplösningen i tid och rum är mycket bra men de fält som ska mätas är mycket svaga vilket gör att tekniken är ytterst känslig för störningar och kräver omfattande åtgärder för att skärma av omgivningens magnetfält.

fMRI. Funktionell magnetresonanstomografi mäter hur aktiv hjärnan är med en mycket bra upplösning i rum (~2 mm) men dålig upplösning i tid (flera sekunder). Med fMRI kan man göra kartor som beskriver hjärnaktiviteten när försökspersonen löser olika uppgifter. Idag krävs det stor och dyr utrustning för att utföra fMRI men det är möjligt att framtida fMRI-utrustning kan bli möjlig att använda i fält (Blümich, 2008). Orsaken till att medicinsk MRI kräver så stora anläggningar är att det behövs mycket starka och homogena magnetfält. Forskare arbetar dock på att med hjälp av beräkningskrävande metoder kunna göra samma typ av mätningar i mycket svagare inhomogena magnetfält som då skulle kunna genereras av små handhållna apparater. NMR-Mouse⁸ är ett tidigt exempel på denna tekniktrend vilken också stöds av framsteg i utveckling av små men starka magneter⁹.

fNIRS. Funktionell infraröd spektroskopi kartlägger aktivitet i hjärnan genom att mäta reflektion av laserstrålning i våglängder som tränger igenom hud och ben men som växelverkar med molekyler som deltar i hjärnans energiomsättning (Ferrari och Quaresima, 2012). Upplösningen i rum och tid är ungefär 10 mm respektive 50 ms men det är bara hjärnans yta som kan skannas vilket inte behöver vara en nackdel eftersom hjärnans ytlager hanterar många viktiga kognitiva funktioner. fNIRS-utrustning är transportabel, lätt att använda och finns tillgänglig kommersiellt¹⁰. En fördel med fNIRS jämfört med EEG och fMRI är att tekniken är relativt okänslig för elektromagnetiska störningar.

<http://neurosky.com/products-markets/eeg-biosensors/>

⁷ <http://www.openbci.com/>

⁸ <http://www.nmr-mouse.de/>

⁹ <http://www.technologyreview.com/news/419330/palm-size-nmr/page/1/>

¹⁰ <http://www.hitachi-medical-systems.eu/products-and-services/optical-topography/etg-4000.html>;

<https://www.rogue-research.com/>;

<http://www.biopac.com/fnir-faq>

Metoder som kräver kirurgi. EEG fungerar mycket bättre om sensorerna placeras innanför skallbenet men utanför hjärnhinnan. Det borde också vara möjligt att förbättra EEG genom att lägga elektroder under huden eller tatuera elektroder i underhuden¹¹. Ännu effektivare övervakning av specifika delar av hjärnan uppnås om elektroder opereras in i själva hjärnan. Kirurgiska ingrepp har dock stora risker vilket närmare diskuteras i avsnitt 3.3.2. Se Rao, 2013 för detaljer om elektrodplacering.

3.2.2 Tankeläsning - forskningstrender och prognos

Hjärnskanning kommer att användas för rekrytering, för att styra och utvärdera utbildning samt för att övervaka förare och operatörer. Vi människor har mycket begränsad självkännedom både beträffande våra egna egenskaper och våra förmågor. Psykologisk forskning har under de senaste århundradena övertygande demonstrerat att tankar, känslor och attityder som vi är medvetna om bara är toppen av ett mycket djupt isberg av omedvetna tankar, känslor och attityder. Forskning har också visat att vi inte har förmågan att läsa av och bedöma våra medmänniskor så effektivt som vi själva tror. Denna situation försvåras av en tendens att människor har en överdriven uppfattning om sin egen självinsikt och sin förmåga att förstå och bedöma andra. Många organisationer har också inarbetade processer som bygger på att människor utvärderar varandra trots att effektiviteten i detta är mycket låg. Se Kahneman (2011) för en pedagogisk översikt av den psykologiska forskningen som översiktligt beskrivs i detta stycke.

Med hjärnskannings-teknik skulle vi kunna få mycket mer objektiva och djuplodande analyser av människors tankar, känslor och attityder. Instrumenten skulle kunna fånga omedvetna tillstånd som vi annars inte har tillgång till eller kan kommunicera. Notera att hjärnskanning typiskt inte kommer att kunna läsa detaljerat tankeinhåll utan i praktiken är begränsad till att registrera övergripande tankemönster. Det går att se om en människa tänker analytiskt eller reagerar känslomässigt men det går inte att avgöra vilken politisk inställning personen har eller om personen tänker köpa en bil eller en båt. Det enda sättet att skaffa en djupare insikt i tankarnas innehåll är genom omfattande individuell träning av en maskininlärningsfunktion som lär sig hur hjärnskannerns data

¹¹ <http://techland.time.com/2013/02/22/finally-tattoos-that-let-you-control-objects-with-your-mind/>

relateras till personens tankar. Med fMRI-skanning kan man läsa vilka bilder försökspersoner tänker på men det bygger på att processen noga har kalibrerats för varje individuell försöksperson i omfattande träning då försökspersoner tittat på olika bilder så att maskinen kan lära sig den individuella responsen för olika typer av avbildade objekt (Kay m.fl., 2008). Forskare har även lyckats med att med hjärnskanning läsa av vilken siffra en person tänker på men endast efter omfattande maskininlärning av signalmönster hos samarbetande försökspersoner¹².

Det har ofta föreslagits att hjärnskanning kan användas för att undvika informationsstress och mental överlastning av operatörer och beslutsfattare. Enstaka specialiserade tillämpningar av detta kan inte uteslutas men generellt är utsikterna inte lovande. En övergripande svårighet är att det kräver ett mycket intelligent system som balanserar informationsflödet med ledning av operatörens eller beslutsfattarens mentala tillstånd. I realistiska operativa och taktiska situationer är det svårt att definiera enkla regler som talar om vilken information som har högst prioritet. En maskin som kan göra avdömningar om vilken information som människan behöver för att fatta bra beslut måste ha så hög kompetens att den vore kapabel att själv fatta besluten. För att förstå vilken information som är relevant behöver systemet en god situationsuppfattning, kunskap om operatörens mål och en förmåga att tolka meningen i de data som ska filtreras. Den filtrerande maskinen måste med andra ord kunna förutse vilka beslut som är bäst och vilken information som människan behöver för att kunna ta dessa beslut. Med så kompetenta maskiner är det i många fall troligen snabbare och effektivare att lämna besluten åt maskinen. Man kan därför förutse att de avancerade operatörsstödssystem som använder hjärnskanning och informationsfiltrering löper stor risk att konkurreras ut av ännu effektivare autonoma system som tar över operatörens uppgifter och endast behöver övergripande strategisk ledning.

Att använda hjärnskanning för att övervaka soldater i fält är förenat med stora svårigheter eftersom de flesta tillgängliga skanningstekniker är mycket känsliga för elektromagnetiska och mekaniska störningar och därför är svåra att göra tillräckligt robusta för bruk i fält. DARPA-programmet AugCog syftade bland annat till att utveckla fältmässiga system där informationsöverlastning undviks genom övervakning med hjärnskanning och andra biometrisk tekniker. Efter sju år var resultaten inte lovande (St. John, Kobus, Morrison och Schmorrow, 2004; Boland, 2008). Att få systemen att fungera under fältmässiga förhållanden, att sammanfatta tolka signalerna från många var för sig brusiga och opålitliga källor samt att hantera individuella variationer i försökspersonernas reaktioner visade sig vara de främsta problemen. En generell svårighet för alla liknande försök är att övertygande visa att något har förutsättningar att fungera i praktiken

¹² <http://www.scientificamerican.com/article/our-brains-have-a-map-for-numbers/>

genom en serie experiment som i sig inte kan förutse eller täcka in alla situationer som kan uppstå i fält. Rao (2013) beskriver ytterligare praktiska svårigheter med EEG. Det kan ta upp till en halvtimme att få elektroderna på plats och små variationer i elektrodplacering gör att prestanda kan skifta dag för dag vilket gör att daglig omträning kan vara nödvändig. Hjärnskanning i fält kommer en dag att bli möjligt men kommer att introduceras minst 10 år senare än motsvarande system för inomhus- och fordonsmiljöer.

Hjärnskanning kan även i viss mån användas för att övervaka ovetande eller ovilliga personer men det är bara vissa basala tillstånd som kan detekteras och risken för felslut är stor. Detta beror på att alla hjärnor är olika och att det bara är vissa grova indikationer som är relativt lika för de flesta (se avsnitt 3.1). Tillstånd som stark rädsla, intensiv tankeverksamhet eller beredskap till fysisk handling skulle kunna detekteras hos de flesta. Men detaljer som vad man är rädd för, vad man tänker på eller vad man tänker göra är inte möjliga att läsa av utan att personen som ska övervakas samarbetar med övervakarna i intensiv och långvarig träning. Därigenom kan det tyckas vara osannolikt att det kommer att bli möjligt att övervaka hjärnan på människor som inte samarbetar eller genomföra någon sorts massövervakning. Möjligen skulle man kunna tänka sig att övervaka flygpassagerare i syfte att identifiera extremt stressade människor bland vilka man kan vänta sig att finna eventuella terrorister, knarksmugglare och flygkapare. Det borde vara mycket svårare för en auktoritär regim att hitta dissidenter med hjärnskanning eftersom skannersignaler som motsvarar så specifika tankar som politiska idéer är högst individuella. Däremot bör det vara möjligt att bygga en effektiv lögn-detektor eftersom detta bara kräver monitorering av vilken typ av aktivitet hjärnan ägnar sig åt (se nedan). Man kan detektera att personen ljugar utan att för den skull kunna avslöja vad sanningen är. Att med hjärnskanning läsa detaljerat tankeinhåll hos en person som aktivt motsätter sig detta är förmodligen omöjligt.

I framtiden kan man dock tänka sig att det blir vanligt att människor frivilligt tränar upp en hjärnskanningsalgoritm som sedan används i videospel, media-upplevelser och informationssökning. En hjärnskanner skulle kunna hjälpa spel, mediaspelare och sökmotorer att optimera upplevelsen. Svårighetsgraden i ett spel kan anpassas till om spelaren är uttråkad eller överstimulerad. Innehåll och tempo i en film kan anpassas till tittarens preferenser. Den som gillar en lång biljakt får se mer medan den som blir uttråkad får se mindre. Sökmotorn får effektiv feedback från sökarens undermedvetna och kan snabbt lära sig att anpassa resultat och reklam till användarens medvetna och omedvetna önskemål. Om sökmotorer, spelföretag och media-leverantörer har tillgång till algoritmer som med användarens goda minne har tränats för att tolka användarens hjärntillstånd så är det inte speciellt långsökt att även myndigheter skaffar sig tillgång till denna förmåga. I så fall skulle det kunna bli möjligt att läsa detaljerat tankeinhåll även för personer som inte medvetet skulle medverka till att bli övervakade. Notera att det finns en aktiv gör-det-självrörelse som bygger och

använder hjärnskanners med open-source metoder¹³. I framtiden kanske vi blir övervakade med hjärnskanners som vi själva har byggt och tränat på samma sätt som vi idag blir profilerade och övervakade med hjälp av information som vi frivilligt delar med oss av.

Som tidigare nämnts finns många olika typer av biosensorer som ger information om människors sinnestillstånd inklusive pulsmätare, pupillsensorer, bildanalys¹⁴ och hudkonduktansmätare (som mäter svettning). Hjärnskanning kommer att användas i kombination med dessa och resultaten från de olika sensorerna kommer att fusioneras. När man i framtiden skapar bättre teoretiska modeller för hur hjärnan fungerar och därmed kan bygga realistiska simuleringsmodeller bör det också bli möjligt att utvinna mer av den dolda informationen i data från hjärnskanners och från andra biosensorer. Om vi ser 25-50 år fram i tiden kan effektiv teoretisk modellering av individuella hjärnor göra det enklare att i stor detalj läsa av hjärnor även utan omfattande frivillig träning. Dessa slutsatser kommer dock att behöva omprövas bland annat för att det ständigt utvecklas nya metoder för hjärnskanning, däribland speciellt metoder som kan följa pågående processer och därmed synliggöra hjärnans dynamik. Som ett exempel kan nämnas hur MIT har utvecklat fMRI för att följa hur signalsubstanter i hjärnans belöningssystem frigörs och används (Lee m.fl., 2014)¹⁵.

3.2.3 Tankeläsning: trender och tillämpningar

3.2.3.1 T1 Minskad reaktionstid

Reaktionstiden är tiden mellan att ett system tar emot en signal och att systemet agerar som svar på signalen. En människas reaktionstid är typiskt ungefär 150 millisekunder med betydande variationer beroende på individ. En sprinter som börjar springa när startpistolen smäller behöver till exempel 160 – 190 millisekunder för att reagera (Lipps, Galecki och Ashton-Miller, 2011). Med hjälp av hjärnskanning och datorhjälp bör det i framtiden gå att minska reaktionstiden för ett människa-maskin system ned till ungefär 50 millisekunder. Efter 50 millisekunder har hjärnan registrerat och tolkat signalen. Detta registreras av en hjärnskanner, kommuniceras till en dator som automatiskt utlöser åtgärden. Denna automatiska del av det framtida människa-maskin-systemet behöver bara ett fåtal millisekunder för att reagera. I en duell eller krocksituation kan en tidsvinst på 100 millisekunder kunna vara avgörande. Notera att vi här vänder på den vanliga tanken om att sensorer kan automatiseras men att människan ska ta själva beslutet, till exempel om att bekämpa ett mål. Det är människans perception som överglänser maskiner medan maskiner är mycket snabbare på att

¹³ <http://www.theverge.com/2013/9/22/4756816/can-darpa-spark-a-diy-brain-scanning-movement>

¹⁴ <http://actu.epfl.ch/news/emotion-detectors-could-make-driving-safer-2/>

¹⁵ <http://newsoffice.mit.edu/2014/delving-deep-into-the-brain-0501>

analysera och agera. I situationer där reaktionstid är avgörande går det att vinna minst 100 millisekunder till priset av att lämna beslut och utförande till en automatiserad funktion. För människan kommer det att kännas mycket ovant och märkligt när omedvetna planer utförs innan man själv blivit medveten om planen.

En av granskarna av denna rapport (Linus Gisslén) påpekar att ett hjärnskanningsbaserat system skulle kunna försvaga människans impulsivitet snarare än att förstärka den. Systemet skulle kunna försäkra sig om att människan har använt högre exekutiva funktioner för att ta ett beslut och låsa utrustning om inte förefaller som människans beslut är väl övervägt. Detta skulle kunna hindra olyckor och skador genom oavsiktlig militär eldgivning mot egna styrkor eller mot civila.

Tidshorisont: tio år.

TRL-nivå¹⁶: 2

3.2.3.2 T2 Effektiva lögndetektorer

Det kommer att bli möjligt att avslöja lögner med hjälp av hjärnskanning. För en människa är det mycket svårt att skilja en lögn från en sanning baserat på röst, kroppsspråk och ansiktsuttryck (Bond och DePaulo, 2006) men processen i lögnarens hjärna är mer komplex än för sanningsägaren. Den ljugande hjärnan vet sanningen, hittar på lögnen, kontrollerar att lögnen är konsistent med det som åhörarna vet och oroar sig för att bli avslöjad. Det hävdas därför att specifika regioner av hjärnan är känsliga för motsägelser och blir mycket aktiva i lögnarens hjärna. Flera företag¹⁷ inriktar sig på att med hjälp av hjärnskanningsteknik (fMRI) bygga lögndetektorer som man hävdar kan avslöja lögner med mer än 95 % noggrannhet. Farah m.fl. (2014) granskade nyligen denna teknik och poängterade de stora metodologiska och etiska problemen förknippade med hjärnskannings-baserade lögndetektorer. Deras metaanalys visar dock att experiment med fMRI-baserade lögndetektorer med god konsistens identifierar samma aktivitetsmönster i lögnarens hjärna. Därför verkar det troligt att tekniken kommer att kunna utvecklas till effektiva detektorer inte bara av lögner utan också av andra sinnenstillstånd som en person kan önska hemlighålla. Det bör till exempel vara möjligt att mot en persons önskan identifiera om personen känner igen något i en bild eller om personen starkt gillar eller starkt ogillar något som visas. Hjärnskanning för lögndetektering kräver idag stora och dyra apparater men inom 10-20 år bör dessa kunna krympas till samma storlek som dagens handhållna apparater.

Tidshorisont: fem år.

TRL-nivå: 6

¹⁶ Strategi för Försvarsmaktens forskning och utveckling, HKV 21 000:52385

¹⁷ No Lie MRI (<http://www.noliemri.com/>)
Cephos (<http://cephosdna.com/>)

3.2.3.3 T3 Optimerad rekrytering

Det kommer att bli möjligt att rekrytera effektivare med hjälp av hjärnskanning. Vi vet att människor har olika *kognitiv stil* det vill säga att de använder hjärnan på olika sätt även när de löser samma uppgift. Lai m.fl.(2012a, 2012b) har till exempel visat att tendensen att analytiskt bygga regelsystem respektive tendensen till att empatiskt sätta sig in i andras mentala tillstånd är grundad i mätbara olikheter i hjärnans struktur och funktion. Individens tendens till risktagande eller till att undvika risk är relaterat till kognitiv stil. Risken för skador och psykiska problem kan också vara relaterad till kognitiv stil. I framtiden skulle sådana olikheter i kognitiv stil kunna vara objektivt mätbara med neurovetenskapliga metoder och därmed vara ett användbart underlag för rekrytering och urval av människor till uppgifter där en viss kognitiv stil är mer lämplig än en annan, eller att en specifik grupp-mix av kognitiv stil är att föredra. Stabsofficeren som säger sig förstå planen men egentligen är förvirrad kan demaskeras, risken för post-traumatiskt stressyndrom kan kartläggas vid rekrytering av soldater, kandidater till ubåtsjänst med väl dold latent klaustrofobi kan identifieras och sökande till utlandstjänst med rasistiska attityder kan sorteras bort redan i förväg.

Tidshorisont: femton år.

TRL-nivå: 2

3.2.3.4 T4 Operatörsövervakning

Det kommer att bli möjligt att med hjärnskanning och andra biosensorer identifiera oönskade tillstånd hos operatörer som till exempel panik, extrem stress och stor trötthet. Hjärnskanning av operatörer kombinerad med flexibla och delvis autonoma tekniska system ger stora möjligheter att bygga säkrare och effektivare människa-maskin system. En operatör som grips av panik och slutar agera rationellt kan till exempel identifieras av ett EEG-system innan några felaktiga åtgärder har verkställts (Sanei och Chambers, 2007). Systemet kan då larma chef och eventuellt låta ett autonomt system ta över. Trötthet och uttråkning leder ofta till att operatörens vakenhet sjunker och till episoder av mikrosömn (Royal, 2003). Hjärnskanners kan med hög noggrannhet kartlägga operatörens vakenhet och larma eller åtgärda om denna sjunker till en farlig nivå. När sådana system blir vanliga kommer vi att chockeras över hur låg uppmärksamhet människor vanligen har när de löser viktiga uppgifter. Detta kommer att driva krav på automatisering.

Tidshorisont: tio år.

TRL-nivå: 4

3.2.3.5 T5 Optimerad träning

Hjärnskanningsteknik kan övervaka att träning fungerar på rätt sätt. En pilot som tränar i simulator skulle kunna utföra träningsmoment korrekt utan att ha en korrekt förståelse för situationen. Om hjärnans tillstånd övervakas kan en träningsledare övertyga sig om att träningen fungerar på semantisk nivå. Ett

uppdykande hot bör till exempel engagera hjärnans system för hothantering även om det inte leder till någon omedelbar åtgärd. Att lösa ett problem och välja en av flera möjliga handlingsvägar bör engagera hjärnans system för problemlösning. Med hjälp av hjärnskanning kan övningsledaren upptäcka om eleven inte upptäcker hot eller inser att det finns flera olika lösningar. Det kommer i ökande utsträckning bli möjligt att monitorera att de som tränas tänker rätt och inte bara gör rätt.

Tidshorisont: femton år.

TRL-nivå: 2

3.2.4 Styra med tanken - forskningstrender och prognos

I djurförsök har man visat att apor kan styra robotarmar med inopererad elektronik som ansluter till hjärnans motoriska centra. Aporna lär sig snabbt att vissa tankemönster får robotarmen att göra det de vill som till exempel att föra någon godbit till munnen. Kirurgiska interventioner på människor i syfte att ge förmåga att styra teknisk utrustning kommer dock bara att vara aktuellt om syftet är att lindra vissa svåra handikapp som till exempel att ge totalförlamade ökad livskvalitet (Mindre operationer i hobby-syfte förekommer i och för sig¹⁸ men från detta till riktig hjärnkirurgi är det ett mycket långt steg). Eftersom de delar av hjärnan som styr musklerna är väl kartlagda är det relativt lätt att ansluta tekniska komponenter så att patienten efter träning kan styra teknisk utrustning genom viljestyrda rörelser. Detta har också gjorts experimentellt för att ge förlamade kontroll över proteser och kommunikationsutrustning. För ohjälpligt förlamade kan det ses som rimligt att återanvända de delar av hjärnbarken som normalt styr kroppen rörelser till att styra utrustning som underlättar livet för patienten. Genom att använda dessa motoriska delar av hjärnbarken blir det också lättare för patienten att med träning integrera styrningen så att utrustningen upplevs som en förlängning av kroppen. I de flesta fall där man önskar ge amputerade kontroll över proteser är det dock säkrare och ger bättre resultat att ansluta elektronik till befintliga nervändar utanför hjärnan. För friska är det inte lika lätt att hitta delar av hjärnan som kan återanvändas för att styra utrustning. De motoriska delarna av hjärnbarken är ju redan upptagna med att styra en fungerande kropp. Om man till exempel återanvänder ett område som kontrollerar höger tumme till att styra en robotarm finns det risk att tummens funktion försämras. Se avsnitt 3.3.2 nedan för en längre diskussion om kirurgisk intervention. I det följande fokuserar vi på vad som är möjligt utan kirurgi.

Det har sedan länge varit möjligt att styra med tanken via EEG. En person kan lära sig att anpassa sina tankemönster och därmed kontrollera karaktären på EEG-signalen. Det går till exempel att styra ett spel genom att avsiktligt anpassa det mentala tillståndet på skalan avslappning-fokusering. Effektivast görs detta

¹⁸ http://www.svd.se/nyheter/idagsidan/kroppen-som-projekt_3705070.svd?sidan=1

genom en kombination av att människan och maskinen anpassar sig till varandra. Det största problemet med EEG-baserad tankestyrning är att bandbredden är låg och i bästa fall motsvarar ungefär en bit i sekunden så att man till exempel kan skriva text på engelska med ungefär ett tecken i sekunden (Rao, 2013). Bitfel är vanliga vilket både drar ned bithastigheten och gör att processen upplevs som arbetsam och frustrerande. Eftersom människor skriver på tangentbord i hastighet motsvarande 2-4 tecken i sekunden och kontrollerar datorspel mycket effektivare med mus och joystick har tankestyrning inte slagit igenom som användargränssnitt för människor utan allvarliga funktionshinder.

MEG är inte lovande som tankestyrningsmetod på grund av att det krävs noggrant avskärmade lokaler. fMRI har mycket lägre tidsupplösning än EEG och kommer därför inte ens på längre sikt att vara användbar för tankestyrning med hög bandbredd. fNIRS är begränsad till att läsa av hjärnans ytlager vilket inte behöver vara ett problem eftersom det lämpligaste sättet att styra skulle vara att man tänker på att utföra rörelser med kroppen som till exempel gester med händerna. Med fNIRS skulle man kunna läsa av de väldefinierade delar av hjärnans yta som kontrollerar gesterna. Visualiserade rörelser engagerar delar av hjärnans motoriska system på samma sätt som verkliga rörelser. För närvarande är dock den informationsbandbredd som uppnås med fNIRS lägre än den för EEG.

Huvudproblemet med alla former av tankestyrning är den låga informationsbandbredden. Vi definierar denna som antalet korrekta bitar per sekund som kan överföras. Eftersom bitfel förekommer är informationsbandbredden korrigerad för detta så att den blir lägre än den okorrigerade strömmen av bitar. Den högsta informationsbandbredden för tankestyrning som vi har hittat i litteraturen är 1.17 bitar per sekund och uppnåddes med EEG (Rao, 2013). Det bör dock noteras att nya hjärnsskanningsmetoder är under utveckling där till exempel ett genombrott inom optiska metoder (diffuse optisk tomografi, DOT) nyligen rapporterades (Eggebrecht, m. fl. 2014)¹⁹.

Tankestyrning har fördelen av att frigöra kroppens muskler från uppgiften att styra ett system men en generell nackdel är att medveten tankestyrning kräver mental uppmärksamhet i mycket högre grad än manuell kontroll. I de flesta militära situationer är soldatens uppmärksamhet en mycket begränsad resurs – att mentalt fokusera på att kontrollera utrustningen är troligen ofta en större nackdel än att behöva använda händerna. Om soldatens uppmärksamhet är splittrad kommer felfrekvensen i tankestyrningen att öka. Den låga bandbredden och höga felfrekvensen i dagens tankestyrningssystem gör varje användning i tidskritiska militära situationer omöjlig. I icke tidskritiska situationer är det svårt att hitta

¹⁹ <https://news.wustl.edu/news/Pages/26960.aspx>

tillämpningar där det är värt kostnad och besvär att tillföra utrustning för ett extra användargränssnitt som ger så lite bandbredd som en bit per sekund.

Kommer det i framtiden att bli möjligt att öka informationsbandbredden för tankestyrning? Idag uppnås ungefär sju bitar per sekund om elektroder placeras in kirurgiskt. Detta kan ses som en övre gräns för vad som i framtiden går att uppnå genom icke-kirurgiska metoder men med förbättrade sensorer och signalbehandling. Sju bitar per sekund motsvarar ungefär ett Ja/Nej beslut per ett tidsintervall som motsvarar en mänsklig reaktionstid för medvetna beslut. Med vanlig manuell styrning uppnås mycket högre bandbredder och kortare reaktionstider. Evolutionen har försett människan med sofistikerade system för att medvetet träna in en förmåga som sedan kan exekveras mycket snabbare än genom medvetna beslut på grund av inbyggda träningsbara genvägar i nervsystemet och hjärnan. Tankestyrning av tekniska system är evolutionärt sett ett nytt påfund och därför fungerar det inbyggda systemet av genvägar inte lika bra som för manuell styrning. Det är därför svårt att se att man med något som liknar dagens system för tankestyrning skulle kunna uppnå radikalt högre bandbredd än för manuell styrning. Ännu högre bandbredd än sju bitar per sekund skulle vara möjlig om den semantiska nivån kan höjas det vill säga om sensorerna kan fånga mer komplexa tankar än binära beslut. Om framtida hjärnskanning med hög precision kan registrera komplexa tankar som till exempel ”avge nedhållande eld medan jag framrycker mot vägkorsningen” skulle tankestyrning bli användbar för att styra robotar i fält. Vår bedömning är att sådan detaljerad hjärnskanning inte kommer att bli möjlig inom de närmaste 25 åren.

3.2.5 Styra med tanken - möjliga tillämpningar

Givet den begränsade bandbredden och de höga kraven på mentalt fokus hos existerande tankestyrningssystem ser vi inte några lovande tillämpningar för försvar och säkerhet inom de närmaste 25 åren. En mer detaljerad motivering av denna tidshorisont återfinns i avsnitt 4. Notera dock att det finns forskare som inte delar denna uppfattning utan satsar intensivt på att utveckla tankestyrning. Universitetet i München rapporterade nyligen ett genombrott i Brainflight-projektet där försökspersoner styr en flygsimulator med EEG²⁰.

3.3 Bygga ut och förbättra hjärnan

Detta avsnitt handlar om hur man med olika typer av interventioner kan styra hjärnans funktioner, vanligen i syfte att effektivare utföra någon uppgift.

²⁰ <http://www.tum.de/en/about-tum/news/press-releases/short/article/31531/>

3.3.1 Instrument som styr hjärnan

3.3.1.1 Transkraniell elektrostimulering

Transkraniell elektrostimulering innebär att en svag likström går genom hjärnan via elektroder som placeras på skalpen. På engelska heter metoden transcranial direct current stimulation och förkortas tDCS. Effekten av elektrisk ström på kognitiva funktioner har varit känd sedan antiken men det är under de senaste femton åren som forskare har visat att tDCS har betydande effekter på bland annat inlärning och uppmärksamhet. Effekten kan vara både positiv och negativ för en given förmåga och beror på strömstyrka, var strömmen appliceras och polaritet. Effekter uppstår efter några minuter och verkar kvarstå i dagar även om det finns lite forskning på långtidseffekter. En bra vetenskaplig översiktsartikel om tDCS är Coffman, Clark och Parasuraman, 2014. Några experiment inom militära tillämpningar är det tidigare nämnda av McKinley m.fl., 2013 som visar att förmåga till bildanalys kan förbättras avsevärt med tDCS. Clark et al (2012) visar att effekten av träning i att känna igen farliga objekt i virtuella miljöer kan fördubblas med hjälp av tDCS. En förklaring till den stora effekten i detta experiment kan vara att man använde fMRI för att för varje individ identifiera anatomisk position av de delar av hjärnan som är viktiga för den aktuella förmågan och applicerade tDCS just på dessa delar.

Mekanismerna bakom tDCS är inte kända men det verkar troligt att den omedelbara effekten är att påverka neuronernas tröskel för aktivering. Dessutom vet man att halter av signalsubstanser påverkas lokalt (Clark m. fl., 2012). De långsiktiga effekterna måste bero att hjärnans plasticitet förändras så att den blir mer eller ibland mindre påverkad av träning. Ny forskning tyder också på att tDCS påverkar hjärnans struktur genom att förstärka isoleringen runt axonknippen så att signaler transporteras snabbare²¹. Ett experimentellt problem som gör att man måste ta rapporterna om framgångar med tDCS med en nypa salt är att försökspersoner känner om strömmen appliceras eller inte. Det gör att det är svårt att konstruera de blindtester som är viktiga för att visa att resultaten inte helt eller delvis beror på placeboeffekten. Horvath, Carter och Forte (2014) ger en bra översikt över de experimentella utmaningarna.

Säkerheten för tDCS förefaller för närvarande vara god eftersom det saknas rapporter om allvarliga biverkningar. Men eftersom mekanismerna bakom tDCS inte är kända går det inte att utesluta att det kan uppstå negativa effekter på lång sikt och det saknas studier av långsiktig säkerhet. Vi vet också att tDCS kan ge negativa effekter som till exempel längre reaktionstid. Eftersom man i tDCS-studier bara testar försökspersoner på ett fåtal förmågor kan det finnas oupptäckta negativa effekter på andra områden som i värsta fall kan kvarstå

²¹ <http://www.scientificamerican.com/article/amping-up-brain-function/>

under en längre tid. En del av dessa effekter kan vara subtila men potentiellt allvarliga.

tDCS är definitivt en viktig kandidat för framtida användning för att förbättra friska människors mentala förmåga. Effekternas storlek och varaktighet är relevanta för många operativa tillämpningar. Utrustning för att applicera tDCS kan göras lätt och robust. En viktig ny utveckling är att det tas fram utrustning för att med hög upplösning applicera tDCS²². Givetvis finns det en växande rörelse av amatörer som experimenterar med tDCS²³.

3.3.1.2 Transkraniell magnetfältstimulering

Transkraniell magnetfältstimulering innebär att kraftiga pulsade magnetfält lokalt påverkar hjärnan. På engelska heter metoden Transcranial magnetic stimulation och förkortas TMS. Effekten beror på att ett varierande magnetfält inducerar elektriska fält som i sin tur påverkar hjärnan. TMS kan användas för att stimulera eller blockera funktionen i ett utvalt område. En TMS-puls på ett ställe i hjärnan kan till exempel orsaka ofrivilliga handrörelser medan en puls på ett annat ställe ökar förmågan att fokusera. Genom att applicera TMS på en del av hjärnan som förutser hur föremål kommer att röra sig kan man till exempel störa förmågan att upptäcka rörliga mål. Att blockera hjärnfunktioner förefaller vid första anblick inte som så användbar men hjärnan är ett komplext system där det är mycket vanligt att hjärnmoduler håller tillbaka varandra så att blockering av en funktion stimulerar en annan funktion. Australiska forskare har till exempel visat att motoriska förmågor som till exempel frihandsteckning kan förstärkas genom att med TMS blockera moduler som är relaterade till högre kognitiv förmåga (Snyder, 2009; Chi och Snyder, 2012). Det bör noteras att även om tillfällig applicering av TMS inte förefaller skada hjärnan så är långtidseffekter av upprepade TMS inte kända.

Forskning om TMS har varit mycket aktiv under de senaste 15 åren och sammanfattas av Luber och Lisanby (2014). De forskare som intresserar sig för att förbättra friska människors prestationer har påvisat intressanta effekter på perception, motorisk förmåga²⁴ och beslutsfattande. Generellt är effekterna inte lika stora och tydliga som i de mest framgångsrika tDSC-försöken. Man har hittat tre typer av verkan. *Icke-specifika effekter* verkar på stora delar av hjärnan och skulle kunna bero på att TMS lokala effekter påverkar hela systemets aktivitetsnivå vilket till exempel kan minska reaktionstider. *Lokal facilitering* verkar genom att lokalt stimulera delar av hjärnan som är viktiga för den förmåga som man vill stärka. En möjlig mekanism är att tröskeln för aktivering av neuroner sänks så att det blir lättare att regera på svaga stimuli. Detta skulle till

²² <http://soterixmedical.com/hd-tdcs>

²³ <http://www.diytdcs.com/>

²⁴ <http://www.washington.edu/news/2013/08/27/researcher-controls-colleagues-motions-in-1st-human-brain-to-brain-interface/>

exempel kunna förklara att TMS riktad mot valda delar av hjärnans visuella system kan stärka förmågan att snabbt reagera på svaga stimuli. *Lokal inhibering* slår tillfälligt ut delar av hjärnan som konkurrerar med de system som utför uppgiften på det sätt som man vill stärka. Effekten av TMS skulle här kunna vara att genom slumpmässig stimulering av neuroner öka brusnivån lokalt så att normala funktioner hämmas. TMS riktad mot en del av hjärnan som analyserar rörelser kan till exempel minska reaktionstiden om uppgiften är att känna igen objekt i statiska bilder. Eftersom analys av rörelser inte behövs blir systemet snabbare om denna funktion tillfälligt stängs av. En intressant tillämpning av TMS är för att motverka effekten av sömnbrist på reaktionsförmåga. En fördel med TMS jämfört med tDSC är att finare upplösning i tid och rum medan en nackdel är att TMS kräver dyrare och mer skrymmande utrustning än tDCS.

3.3.1.3 Transkraniell ultraljudsstimulering

Transkraniell ultraljudsstimulering fokuserar ljudvågor mot den del av hjärnan som ska påverkas. På engelska kallas detta Transcranial ultrasound stimulation och förkortas TUS. Möjligheten att använda TUS har varit känd länge och testats i djurförsök (Bystritsky m. fl., 2011) men det är först under de senaste åren som försök på människor har rapporterats. Hameroff m. fl. (2013) visar att TUS kan påverka humör och delvis också upplevd smärta hos patienter med kronisk smärta. Legon m. fl. (2014) demonstrerade att TUS kan öka förmågan att urskilja fina detaljer när man känner sig för med fingertopparna. Även om det finns mycket mindre forskning beträffande TUS jämfört med tDCS och TMS är potentialen med tekniken stor. Beroende på frekvens kan TUS antingen stimulera eller inhibera hjärnaktivitet. TUS kan också fokuseras med högre rumsupplösning än de andra teknikerna och kan appliceras djupare ner i hjärnan. Den exakta mekanismen för TUS är inte känd men de ledande forskarna föreslår att ljudvågornas mekaniska tryck påverkar neuronernas tröskel för att aktiveras. Eftersom ny forskning visar att cellers utveckling på ett avgörande sätt styrs av lokalt tryck och andra rent mekaniska faktorer i miljön (Tyler, 2012) finns det anledning att vara uppmärksam på eventuella långsiktiga biverkningar av ultraljud. Utrustning för att applicera TUS borde kunna bli robust och fältmässig vilket uppenbarligen DARPA har noterat eftersom man trots att TUS är relativt långt från tillämpningar stöder forskningen.

3.3.2 Metoder som kräver kirurgi

Det går att operera in elektroniska komponenter som styr delar av hjärnan. Mycket vanligt förekommande är cochleaimplantat som innebär att en elektronisk sensor som signalerar till hjärnans hörselcentrum ersätter förlorad hörsel. På samma sätt förekommer det att en elektronisk sensor ersätter en skadad näthinna och därmed ger blindas en viss synförmåga. Inopererad elektronik används även som en sorts pacemaker för att lindra svåra hjärnsjukdomar som till exempel Parkinsons sjukdom. Vidare har forskare visat

att insekter kan göras till styrbara robotar med hjälp av att elektronik integreras i nervsystemet under utvecklingen från larv till flygande insekt²⁵. Hjärnor hos djur som katter, hundar och apor har framgångsrikt styrts med inopererade elektroder. Det är inte heller bara muskelrörelser som kan styras på detta sätt utan även önskemål och vilja. Arsenault m.fl. (2014) har till exempel nyligen visat att det med stor precision går att styra apors preferenser beträffande bilder. På senare år har det blivit möjligt att genetiskt manipulera neuroner så att de kan aktiveras med ljussignaler vilket möjliggör precisare kontroll av hjärnan med mindre omfattande kirurgiska ingrepp (Deisseroth m.fl., 2006). Det är alltså idag tekniskt fullt möjligt att bygga ut hjärnans förmåga med hjälp av inopererad elektronik och elektrooptiska komponenter.

Förutom mer övergripande etiska problem hindras kirurgisk ”förbättring” av friska mänskohjärnor av att hjärnkirurgi innebär risker för svåra handikapp, personlighetsstörningar och dödsfall. Det är dessutom svårt att permanent integrera elektronik i hjärnan vilket gör att även framgångsrika operationer kan behöva göras om. I dagsläget fungerar inopererad elektronik typiskt ungefär ett år. I vissa fall kan det vara möjligt att lägga den elektroniska komponenten mellan skallen och hjärnhinnan vilket gör att riskerna minskar. De etiska problemen gör att det inte bedrivs någon nämnvärd forskning inriktad på säker kirurgisk förbättring av friska människors hjärnor. En tillräckligt samvetslös regim som med hjärnkirurgi vill bygga bättre soldater måste därför investera i ett mycket omfattande forskningsprogram. Ett möjligt scenario där detta skulle kunna hända är om bemannat stridsflyg i framtiden konfronteras med överlägset obemannat jaktflyg. Obemannade farkoster med tillräckligt avancerad AI kommer i duellsituationer ha en fördel på grund av det grundläggande faktum att elektronik är miljontals gånger snabbare än neuroner. I en situation där regimens överlevnad hotas skulle man kunna överväga att kirurgiskt koppla pilotens nervsystem mycket tätare till flygplanets funktioner än vad som är möjligt med normal styrning. Detta förutsätter dock att pilotens långsamma neuroner kompenseras av överlägsen mänsklig situationsuppfattning och perception. Eftersom AI är i snabb utveckling just beträffande dessa egenskaper kommer en eventuell kirurgisk integrering av piloter och operatörer i alla händelser att vara en historisk parentes.

Förutom att möjliggöra styrning av utrustning med tanken har det diskuterats om kirurgi även kunna användas för att förbättra högre kognitiva funktioner. En amerikansk forskargrupp har sedan länge i djurförsök arbetat med en inbyggd ”protes” som ersätter en viktig funktion för långtidsminnet (Berger m.fl., 2011). Djupt nere i hjärnan sitter hippocampus som spelar en viktig roll i processen för att lagra minnet av händelseförlopp. Forskargruppen studerade först med hjälp av inopererade sensorer hur en del av hippocampus fungerar. Därefter tillverkades

²⁵ <http://www.newscientist.com/article/dn17895-freeflying-cyborg-insects-steered-from-a-distance.html#.U7FSpLHEt8E>

en elektronisk komponent som replikerade denna funktion. När komponenten ersatte hippocampus-modulen fungerade långtidsminnet normalt. Här är det viktigt att notera att hela processen bygger på att man kunde studera funktionen hos den naturliga neurala komponenten i en individs levande hjärna för att sedan bygga något som fungerar på samma sätt. Eftersom alla hjärnor är individuella går det inte att bygga en generell elektronisk protes som fungerar i alla hjärnor. Detaljerad individuell anpassning krävs alltid. Av detta skäl (och många andra skäl) är det svårt att bygga en artificiell hippocampus som ger människor dramatiskt bättre minnesförmåga.

Ibland diskuteras möjligheten att kirurgiskt ge människohjärnor internetaccess så att allt vetande i t.ex. Wikipedia upplevs som omedelbart tillgängliga kunskaper. Eftersom minnen kodas på ett distribuerat sätt över stora delar av hjärnan och varje människa har en högst individuell kodning är det svårt att se att det skulle vara möjligt att ens med omfattande ingrepp åstadkomma en sådan tät koppling mellan hjärna och externa datasystem. Hjärnan är ingen dator med standardiserad arkitektur, operativsystem och kodning. Det är det grundläggande problemet för varje försök att kirurgiskt förbättra högre kognitiva funktioner.

En mer realistisk strategi för att förbättra hjärnan kirurgiskt skulle kunna vara att häva blockeringar av önskade funktioner. Evolutionen har utvecklat vår hjärna för att maximera våra geners överlevnad i en helt annan miljö än den vi lever i nu. Vi vet att exceptionella individer långt överträffar normal mänsklig förmåga på många områden. Vissa elitidrottare kan bortse från smärta och därför fortsätta att prestera i situationer där de flesta hade gett upp. Andra unika personer har förmåga att intellektuellt fokusera på en uppgift djupare och under längre tid än vad som är normalt. Vissa musiker har ett absolut gehör och det finns människor med fotografiskt minne. Det skulle kunna vara så att nästan alla hjärnor har dessa förmågor men att de blockeras av andra funktioner i hjärnan. Hjärnan är inte ingenjörsmässigt effektiv konstruktion utan evolutionen har ibland tagit genvägar där oönskade funktioner inte tillbakabildas utan bara hålls tillbaka av reglerande funktioner. För hög smärttålighet är inte bra eftersom det kan göra att vi skadar oss. För hög intellektuell koncentrationsförmåga tar uppmärksamhet från fortplantningen och därmed hota genernas överlevnad. Genom kirurgiska ingrepp skulle det med all säkerhet vara möjligt att göra människor smärt-tåligare och mer orädda. Även högre kognitiva funktioner kanske kan förstärkas genom att undanröja distraherande och tillbakahållande element. Som vi ska se i nästa avsnitt är det dock möjligt att göra denna typ av ingrepp utan kirurgi även om det ändå finns stora risker.

3.3.3 Att frigöra dolda mentala förmågor

Den australiske forskaren Allan Snyder och hans team vid Centre of the Mind i Sydney har länge hävdad att vi alla har dolda mentala förmågor som kan frigöras med någon av de former av transkraniell stimulering som diskuteras i detta

kapitel (Snyder, 2009)²⁶. Snyders teori går ut på att de delar av hjärnan som sköter holistiskt teoribaserat tänkande censurerar de delar av hjärnan som hanterar fakta och konkreta förhållanden. Alla människors hjärnor registrerar och hanterar mycket mer fakta än de flesta har medveten tillgång till. De holistiskt teoretiska delarna filtrerar bort nästan allt och släpper bara igenom det som stämmer med hjärnans dominerande holistiska tolkning av världen. Ovanliga neurologiska tillstånd som till exempel vissa former av autism gör att den interna censuren inte fungerar så att så kallade savant-förmågor uppstår. Savanter har mycket ovanliga förmågor i specifika områden som till exempel numeriska beräkningar, teckning, musik och minnesförmåga. Savanter kan komma ihåg enormt långa sifferföljder, excellerar i huvudräkning eller kan exakt rita av ett landskap ur minnet samtidigt som de kan ha svårt att göra övergripande bedömningar och hantera abstrakta begrepp som är självklara för de flesta. Snyder menar att savant-lik förmåga kan frigöras hos de flesta människor och att detta skulle kunna vara användbart för att lösa speciella uppgifter som till exempel vissa former av problemlösning där svårigheten att lösa problemet beror på förutfattade meningar. Sydneyforskarna har visat att transkraniell stimulering hjälper människor att lösa problem som normalt är olösliga. (Chi och Snyder, 2012). Snyders forskning har ofta dramatiserats i media²⁷ vilket har orsakat en hel del akademisk kritik²⁸.

Författaren till denna rapport tror att Snyder i princip har rätt. Savantförmåga kan uppstå plötsligt vid vissa typer av hjärnskador och den förbättras inte nämnvärt av träning. Det verkar därför troligt att förmågan finns i alla våra hjärnor men normalt inte är tillgänglig genom medveten ansträngning. Kritikerna har dock rätt i att det inte är uppenbart att den förmåga som kan uppnås med transkraniell stimulering är praktiskt användbar, att stimuleringen leder till tillfällig förlust av värdefull förmåga till holistiskt tänkande och att långsiktiga risker för den som utsätts för stimuleringen inte är kartlagda. Snyders form av transkraniell stimulering ökar till exempel förmågan till vissa former av kreativitet samtidigt som den minskar andra typer av kreativitet. När kreativiteten bygger på att bortse från förutfattade meningar och se till konkreta fakta är stimuleringen effektiv. Däremot skadas förmågan att se nya teoretiska samband och skapa nya begrepp.

3.3.4 Neurofarmakologi – förbättra hjärnan med droger

Människan har under tusentals år använt droger för att påverka hjärnan. Vissa av dessa urdroger som till exempel koffein är allmänt använda och så intensivt undersökta att bruket kan betraktas som tämligen säkert. Andra urdroger som till

²⁶ <http://singularityhub.com/2010/08/04/unleashing-the-power-of-the-savant-brain-in-all-of-us/>

²⁷ Se till exempel <http://www.bbc.co.uk/news/health-12356184>

²⁸ Se till exempel <http://www.theguardian.com/science/blog/2011/feb/16/thinking-caps-pseudoscience-neuroscience>

exempel nikotin är fortfarande intressanta för forskning och föremål för debatt. En mellangeneration av hjärnförbättrande droger som till exempel Adderall och Provigil har utvecklats som mediciner under 1900-talet men man har funnit att de även kan fungera för att öka förmåga och minska trötthet hos friska barn och vuxna. Fler än 10 % av amerikanska collegestudenter har använt någon sådan drog för att prestera bättre akademiskt (McCabe m. fl., 2005). Nya droger utvecklas även specifikt för att förbättra friska hjärnor till exempel genom att öka mental energi, minska trötthet och sömnbehov, förbättra arbetsminnet och öka förmågan att etablera användbara långtidsminnen. Den som söker på termer som *neuropsychopharmacology*, *psychopharmacology*, *nootropics* eller *smart drugs* hittar mycket men svårsållad information om hjärnförbättrande droger - information som bland annat på grund av kommersiella intressen ofta är direkt vilseledande.

Generellt är säkerhetsproblemen större beträffande hjärnförbättrande droger för friska än för mediciner för sjuka. Vi kräver högre säkerhet om det är friska människor som ska ta drogen jämfört med om det är människor med svåra sjukdomar som medicineras. Problemet med droger är att de påverkar hela kroppen och hela hjärnan vilket gör att de generellt har större biverkningar än de lokalt specifika interventionerna som till exempel elektromagnetisk eller ultraljudstimulering. Kliniska tester som ska verifiera säkerheten utförs vanligen bara under högst sex månader vilket gör att långtidseffekter typiskt är osäkra. I kliniska tester monitorera man också bara en bråkdel av de förmågor som är viktiga för människor i aktiv tjänst. Droger som påverkar hela hjärnan har många olika effekter²⁹ som till exempel att koffein både gör oss piggare och speciellt i höga doser minskar finmotorisk förmåga. Många oväntade negativa effekter av en drog upptäcks troligen inte i medicinska tester. Att lita på egen och andras erfarenhet är också förrädisk. Ny forskning visar till exempel att akademisk dopning med Adderall gör att studenter upplever sig som smartare utan att enligt en objektiv bedömning presterar bättre (Ilieva, Boland och Farah, 2013).

Troligen kommer det att utvecklas droger som är genuint användbara för att öka mänsklig förmåga på många olika områden inklusive uppmärksamhet, motorisk kontroll och inlärningsförmåga. Speciellt kommer droger som selektivt påverkar hjärnans plasticitet att få stor betydelse för att öka effekten av studier och träning. Drivande faktorer i denna utveckling är den allmänna kunskapsutvecklingen inom neurovetenskap, ökade möjligheter att skraddarsy droger med hänsyn till genetik, selektivt leverera droger till utvalda målområden i hjärnan och genom hjärnskanning objektivt monitorera effekter.

På grund av det begränsade utrymmet och brist på medicinsk kompetens avstår vi här för att detaljerat diskutera eller rekommendera specifika droger.

²⁹ <http://www.theage.com.au/articles/2003/01/17/1042520778665.html>

3.3.5 Hjärnträning

På senare år har det visats att grundläggande hjärnfunktioner är mycket mer träningsbara än man tidigare har trott. Arbetsminnet, det vill säga mängden information som omedelbart är tillgänglig för mental bearbetning, har sedan länge ansetts vara opåverkbar för vuxna. Senare års genombrott visar att detta inte är sant. Med rätt träning kan arbetsminnet utökas. Eftersom arbetsminnets storlek är en vital komponent i det vi kallar intelligens är frågan om dess träningsbarhet av stort intresse för alla verksamheter som bygger på mänsklig mental förmåga. Just nu är denna forskning beteendevetenskap och inte neurovetenskap vilket gör att vi inte gör utrymme för den i denna rapport. I framtiden kan dock en kombination av farmakologisk kontroll av hjärnans plasticitet kombinerad med effektiv evidensbaserad hjärnträning ge stora möjligheter att förbättra mänskliga förmågor. Något som förstärker potentialen för hjärnträning är att man på senare år har lyckats kartlägga de funktioner i hjärnan som ligger bakom vår förmåga att lära oss nya vanor och etablera dessa som hel- eller halvautomatiska reflexer (för en översikt se Graybiel och Smith, 2014). Eftersom intelligens är en avgörande framgångsfaktor för individer och organisationer kommer rätt utnyttjande av hjärnträning att bli en viktig konkurrensfaktor i en relativt nära framtid.

3.3.6 Bygga ut och förbättra hjärnan – forskningstrender och prognos

Levasseur-Moreau, Brunelin och Fecteau (2013) sammanfattar vad vi vet om att förbättra hjärnan med transkraniell stimulering och vad detta kan betyda för försvar och säkerhet. Förbättringsmöjligheter inkluderar motorisk precision, inläring, styrka och uthållighet samt kognitiva förmågor som uppmärksamhet, impuls kontroll och planeringsförmåga. De flesta observerade effekter är rätt små men man noterar att reaktionstid kan minska med upp till 32 millisekunder vilket är mycket relevant i duellskjutning och vissa former av flygstrid. Levasseur-Moreau, Brunelin och Fecteau noterar dock att eventuella negativa effekter på andra förmågor inte är kartlagda. Minskad reaktionstid skulle till exempel kunna vara kopplad till sämre lägesuppfattning. Brem m.fl. (2014) beskriver den så kallade nollsummeteorin om hjärnstimulering som går ut på att varje förbättrad kognitiv förmåga oundvikligen är förenad med försämringar. Brem m. fl.(2014) diskuterar riskerna med tDCS, TMS och liknande tekniker. Sehm och Ragert (2013) tar upp etiska aspekter av att använda hjärnstimulering för militära syften och trycker speciellt på risken av att påverka hjärnan med delvis okända konsekvenser när det gäller hjärnan hos människor som tar beslut om liv och död. I detta sammanhang är det intressant att notera att den neurala basen för moral och etik är i stort sätt okänd (Pascual, Rodrigues och Gallardo-Pujol (2013) samtidigt som vi vet att det med TMS går att påverka moraliskt omdöme (Young m.fl., 2010).

Magnetogenetik är en ny teknik för att kontrollera enskilda neuroner (Knöpfel och Akemann, 2010). Med hjälp av ett virus modifieras DNA i neuroner så att cellerna skapar en ny typ av koppling mot omvärlden. Speciellt designade nanopartiklar förs in i hjärnan och ansluter till kopplingarna som nycklar passar i ett lås. Med ett magnetfält kan nanopartiklarna värmas upp vilket gör att de låser upp kopplingarna och därmed aktiverar neuronerna. Resultatet är att det utifrån går att styra enskilda neuroner djupt inne i hjärnan³⁰. Denna teknik är i sin linda men förtjänar att bevakas i framtida studier.

När vi bedömer potentialen i möjligheterna att förbättra hjärnan med hjälp av tekniska eller farmakologiska metoder grundade i neurovetenskap är det viktigt att jämföra med kända och mer all dagliga interventioner som vi vet är säkra och har god effekt, då främst fysisk träning, hälsosam kost, god sömn samt undvikande av rökning och stress. Det är till exempel väl belagt att fysisk träning har mycket god effekt på hjärnans allmänna kondition, ökar hjärnans plasticitet och förbygger kroniska sjukdomar vilket tillsammans har stor effekt på kognitiv förmåga både på kort och lång sikt (Cotman och Berchtold, 2002; Praag 2009). En trolig evolutionär grund är att varelser som är i rörelse även har större behov av lärande och kognitiv förmåga. När djur flyttar till nya revir kräver det både fysisk ansträngning, problemlösning och inläring av den nya miljön. Att hjärnans plasticitet ökar vid fysisk ansträngning gör det lättare att överleva förändringen. Därför utvecklas och stärks hjärnan som följd av intensiv rörelse. Fysisk träning är dessutom säkert, billigt, lätt att genomföra i Försvarsmaktens organisation och har god effekt på många andra viktiga hälsofaktorer som till exempel hjärt-kärl-hälsa. Kosten är också av stor betydelse för hjärnans kondition eftersom man vet att överkonsumtion av snabba kolhydrater har negativ effekt på hjärnan. Det finns forskare som hävdar att Alzheimers sjukdom bör ses som en form av diabetes där symptomen drabbar både hjärtkärllssystem och hjärnan³¹. Varje förslag på investeringar i tekniska interventioner för bättre hjärnor till exempel baserad på ultraljud eller likström bör obligatoriskt jämföras med effekten av motsvarande investering i kända, säkra, etiskt oantastliga och lätt genomförda interventioner.

3.3.7 Bygga ut och förbättra hjärnan – möjliga tillämpningar

3.3.7.1 T6 Genomskåda vilseledning

Snyders form av transkraniell stimulering skulle kunna användas för att skapa ett sinnestillstånd där det är lättare att genomskåda vilseledning. Militär vilseledning

³⁰ <http://www.buffalo.edu/news/releases/2011/09/12926.html>

³¹ <http://www.newscientist.com/article/mg22029453.400-are-alzheimers-and-diabetes-the-same-disease.html#.U7FVRbHEt8E>

bygger på utnyttja offrets förutfattade meningar till att skapa en falsk situationsuppfattning där allt som strider mot vilseledningen filtreras bort. Vilseledning kan genomskådas genom att bortse från den holistiska tolkningen och fokusera på de konkreta omständigheterna. Detta är mycket svårare än det låter vilket leder till att vilseledning ofta lyckas (Bennet och Waltz, 2007). En metod för att tillfälligt göra människor mer motståndskraftiga mot vilseledning skulle kunna ha stort värde i vissa typer av operationer.

Tidshorisont: tio år.

TRL-nivå: 2

3.3.7.2 T7 Accelererat lärande

Det kommer att bli möjligt att kontrollera den vuxna hjärnans plasticitet det vill säga genom olika interventioner selektivt öppna fönster för kraftigt accelererat lärande (Bavelier m. fl., 2011; Sale, Berardi och Maffei, 2014). Interventioner kan bestå av kombinationer av droger, träning och möjligen mindre kirurgiska ingrepp som till exempel direkt injektion av substanser och stamceller i hjärnan. Accelererat lärande kommer att fungera för inläring av språk, akademiska ämnen, perceptionsförmåga, motoriska förmågor och värderingar. Bastekniker för accelererat lärande kommer att utvecklas inom ramen för civil medicinsk forskning motiverad av möjligheter att bota och lindra effekter av stroke, olyckor, autism och många andra tillstånd som har stor betydelse för individen och samhället. Användning av tekniker för accelererat lärande kommer inte att vara risk- eller biverkningsfritt men risktagandet kommer att vara på samma nivå som risker relaterade till doping i idrott.

Tidshorisont: femton år.

TRL-nivå: 2

3.3.7.3 T8 Bättre beslut

I avsnitt 3.3.1.1 diskuterades hur tDCS kan ge förbättrad förmåga till bildanalys och till att snabbt känna igen farliga objekt. Båda dessa exempel handlar om perception vilket är en mycket viktig del av de flesta beslutsprocesser. Därför är det troligt att hjärnstimulering kommer att användas för att förbättra beslutsförmåga åtminstone i vissa specifika situationer. Om både förmåga till bildanalys och förmåga att identifiera hot förstärks borde det till exempel ha betydelse för stridsteknisk och taktisk ledning.

Tidshorisont: tio år.

TRL-nivå: 3

3.3.7.4 T9 Radikalt ökad mental förmåga

Kunskaper baserade på neurovetenskap kommer i ökande grad möjliggöra att upprätthålla och förbättra mänsklig förmåga under svåra förhållanden och under höga krav på kognitiva prestationer. Medel för detta kommer att inkludera nutrition, livsstil, droger och manipulering av hjärnans tillstånd med TMS, svagström och ultraljud. Relaterat till detta är exoskelett och avancerat beslutstöd baserat på artificiell intelligens som kontrolleras via tanken på det sätt som

diskuteras i denna rapport. Eftersom dessa tekniker diskuteras i systerrapporten om artificiell intelligens hänvisar vi till denna (Gisslén, 2014).

Tidshorisont: femton år.

TRL-nivå: 3

3.3.7.5 T10 Kontrollerad anpassningsbarhet

Reinhart och Woodman (2014) har visat att det med tDCS går att kontrollera hur hjärnan hanterar felaktiga handlingar. Med tDCS går det att undertrycka anpassning till fel så att individen fortsätter ett handlingsmönster som ger oönskat resultat. I vissa situationer kan detta uppfattas som ståndaktighet och viljestyrka. Vid omvänd polaritet i den applicerade likströmmen stimuleras hjärnan att anpassa sig till de upptäckta felen snabbare och effektivare. I vissa situationer kan det uppfattas som ökad förmåga till inlärning och flexibilitet. I dag försöker organisationer hitta rätt mix av viljestyrka och flexibilitet genom rekrytering, organisationskultur och träning. I framtiden kommer det att bli möjligt att styra detta karaktärsdrag genom neurovetenskapligt baserade interventioner.

Tidshorisont: femton år.

TRL-nivå: 2

3.3.7.6 T11 Undvika och lindra neurologiska skador av explosioner

Trots att medicinska aspekter inte ingår i denna rapport gör vi här ett undantag för något som är mycket viktigt men ligger i en gråzon. På senare år har det blivit uppenbart att människor som undkommer explosioner till exempel från IEDer utan synbarlig skada långsiktig kan drabbas av neurologiska problem. Orsaken till dessa kan dels vara psykologiska och dels fysiska mikroskador på hjärnan. Neurovetenskaplig forskning borde kunna leda till bättre diagnos och behandling av sådana syndrom. Interventioner som förbyggande medicinering i nära anslutning till traumat för stimulering av hjärnans plasticitet kombinerad med speciella träningsprogram skulle kunna vara användbara för att reparera skador. Vid stroke vet man att det finns ett fönster på ungefär tre månader då väsentliga förbättringar sker. Kanske finns det ett liknande fönster för läkning av explosionsrelaterad neurologiska skador som kan tas tillvara med rätt behandling. Eventuellt kan det vara av stor vikt att behandling ges omedelbart i anslutning till explosionen. Här bör Förvarsmedicincentrum följa utvecklingen och se till att de framsteg som görs tas tillvara.

Tidshorisont: tio år.

TRL-nivå: 1

3.4 Systemintegrering med neurovetenskap

De neurovetenskapligt baserade tekniker som diskuteras i denna rapport är oftast inte i sig tillräckliga för att uppnå önskad effekt utan måste integreras i större system där sensorer, artificiell intelligens och människor samarbetar. DARPA:s prototyp *Cognitive Technology Threat Warning System* (CT2WS) är ett exempel

på detta³². Målet är att öka soldaters förmåga att upptäcka hot genom att kombinera ett batteri av sensorer med AI-baserad objektigenkänning och automatisk avläsning av operatörens undermedvetna. Sensorerna som inkluderar en videokamera med 120 graders synfält och en radar ger insignal till AI som identifierar farliga objekt. Med hjärnskanning (EEG) fångar systemet operatörens omedvetna igenkänning av hot vilket hjälper AI:n att fokusera på rätt saker. Om AI-analys bekräftar hotet varnar systemet. Tester visar att förmågan att upptäcka hot fördubblas samtidigt som risken för falsklarm är mycket låg. Notera dock att detta är en prototyp och att kommentarerna om fältmässighet för EEG i avsnitt 3.2.2 är relevanta för tillämpbarhet i praktiken. Den begränsade bandbredden för EEG är inte ett problem här eftersom systemet bara läser av en bit (hot eller inte?) samtidigt som systemet vet vilken bild som operatören tittar på. Notera att DARPA:s CT2WS ligger rätt nära framtidsvisionen i avsnitt 3.2.3.1. Om CT2WS utvecklas med ett vapen som automatiskt bekämpar de mål som AI indikerar är vi framme vid en lösning som reducerar total reaktionstid på det sätt som beskrivs i avsnitt 3.2.3.1.

Neurovetenskaplig kunskap spelar en viktig roll för att inspirera utveckling av ny teknik och då speciellt inom artificiell intelligens (Gisslén, 2014). Man kan dra analogin till hur existensen av flygande djur har inspirerat utveckling av flygplan. Bara att veta att något är möjligt driver och inspirerar teknikutveckling. Genom att detalj förstå viktiga delsystem (fågelvingen i glidflykt) kan teoretisk kunskap utvinnas (aerodynamik) som sedan kan tillämpas tekniskt (flygplansvingen). Ju mer vi förstår hur hjärnan fungerar desto mer kan vi återanvända i teknik. Här är det inte bara människohjärnan som inspirerar utan det är minst lika viktigt att förstå djurs intelligens. Vid utveckling av rörliga robotar är det ofta ett mer realistiskt mål att försöka kopiera insekters intelligens. Forskare i Berlin har till exempel byggt en robot som försöker replikera hur honungsbin navigerar och söker föda³³.

³² <http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2012/09/18.aspx>

³³ http://www.fu-berlin.de/en/presse/informationen/fup/2014/fup_14_040-roboter-insekten-fortbewegung/index.html

4 Slutsatser

Hjärnan är det viktigaste verktyget i all mänsklig verksamhet och speciellt för försvar och säkerhet. All forskning och kunskap som kan förbättra vår kognitiva förmåga är av mycket stort intresse. Neurovetenskap och psykologi är grundvetenskaperna för hjärna och kognition.

Neurovetenskapen är i stark utveckling men kan ännu inte erbjuda en kvantitativ, sammanhängande och vetenskapligt grundad förklaring till hjärnans och nervsystemets funktioner på molekylär, cellulär, system eller beteendenivå. Jämför detta med vetenskaper som fysik, kemi och delar av biologi där sådana förklaringar finns. Det är viktigt att förstå att det vetande om neuroner, neuriter, synapser och inlärningsmekanismer som vi skissar i kapitel 1 inte i sig är den sorts förklaring som kan vara grund för en rik flora av tillämpningar. Det saknas en sammanhängande, kvantitativ och experimentellt testbar teoretisk modell.

Kvantitativa, sammanhängande och vetenskapligt grundade förklaringar i ett kunskapsområde är grunden till framgångsrika tillämpningar. Våra industriella revolutioner, nu senast inom bioteknik, bygger på sådana förklaringar. Neurovetenskap kommer också att vara grund för revolutionära tillämpningar men först när de kvantitativa, sammanhängande vetenskapliga förklaringarna finns.

Som ett exempel på hur frånvaro av förklaringar håller tillbaka tillämpningar kan vi analysera användning av svag likström för att förbättra hjärnfunktioner. Det finns experiment som tyder på att detta fungerar. Men vi kan inte förklara *hur* det fungerar och hur hela systemet påverkas. Därför kan vi inte heller veta om det på något sätt skadar hjärnan eller vår kognitiva förmåga och inte heller vilka långtidseffekterna blir. Det är omöjligt att experimentellt undersöka alla eventualiteter. Det skulle till exempel krävas att en tiotusentals försökspersoner utsätts för olika former av likströmsbehandling och noga följs upp under tiotals år. Och inte ens då kan vi vara säkra. Jämför detta med vilket förtroende vi har för broar byggda med hjälp av fysikbaserad ingenjörskonst. Vi har förklaringar och behöver därför inte bygga tiotusentals broar i *kliniska tester* som bevisar att vår bro är säker. Därför kommer likström för hjärnförbättring av friska människor inte slå igenom på bred front innan neurovetenskapen kan erbjuda goda förklaringar.

Notera att dagens neurovetenskap givetvis är mycket viktig och tillämpningsbar för medicinska tillämpningar. Läkarvetenskapen gör sitt bästa för att bota och lindra sjukdomar med den kunskap som finns. Här finns inte möjligheten att vänta på kvantitativa, sammanhängande och vetenskapligt grundade förklaringar. Inom 10-20 år kommer neurovetenskapliga metoder att bli viktiga för diagnostik och tidig upptäckt av psykisk sjukdom vilket kommer att ersätta många av dagens diagnosmetoder som bygger på observation och bedömning av beteende.

Nya mätmetoder och storskalig automatisering kombinerat med generella tekniska och vetenskapliga framsteg gör att vi nu har börjat kartlägga hjärnan i detalj. Utforskandet av Connectonomet är ett exempel på denna trend. Årets genombrott där man lyckades registrera aktiviteten i en insekthjärna i 3D och med hög tidsupplösning kommer att upprepas för allt mer komplexa organismer (Prevedel m.fl., 2014)³⁴. Detaljerad experimentell kartläggning kombinerad med informationsteknikbaserad teoretisk forskning tyder på att neurovetenskapen kommer att komma fram till goda förklaringar inom ett tidsintervall på 25-50 år. När dessa förklaringar börjar komma på plats kommer vi att se en våg av mycket viktiga tillämpningar.

I väntan på det stora genombrottet finns det vissa tillämpningsområden som är uteslutna och vissa tillämpningsmöjligheter som är möjliga även baserade på dagens partiella neurovetenskapliga kunskap.

Generellt kan vi säga att alla former av kirurgiska interventioner i syfte att förbättra friska människor är uteslutna på grund av risker, oförutsägbara biverkningar och långtidseffekter samt etik. Interventioner i friska hjärnor med de flesta droger, ultraljud, elektrisk ström eller magnetfält är i praktiken också uteslutet av samma skäl. Det kommer inte att gå att mobilisera tillräckliga resurser för klinisk forskning för att uppnå tillräcklig effekt och säkerhet. Det finns inte någon industri som har intresse av att satsa dessa resurser på interventioner som typiskt inte är patenterbara eller lätta att produktifiera. Det går naturligtvis inte att utesluta att någon isolerad skurkstat gör försök att förbättra sina soldater med någon av de interventioner som diskuteras i detta stycke men det är svårt att se att detta skulle ge någon avgörande militär fördel som motsvarar den stora investering i forskning och utveckling som krävs innan det finns en betydande öppen civil forskning och utveckling att bygga på.

Under de kommande tjugofem åren kommer icke-medicinska tillämpningar av neurovetenskap främst handla om att med sensorer läsa av hjärnans tillstånd och använda resultatet för rekrytering, utbildning och utvärdering av människor. Att styra teknisk utrustning med hjälp av hjärnskanning begränsas av låg bandbredd och stora krav på mänsklig uppmärksamhet vilket gör att potentialen för tillämpningar är låg. Det finns stora möjligheter att förbättra specifika mentala förmågor med icke-kirurgiska interventioner som elektromagnetiska fält, ultraljud och droger kombinerade med träning. Under de kommande tjugofem åren kommer dock osäkerheten om kort- och långsiktiga biverkningar för sådana interventioner att vara stor vilket gör att samhällen med normal etisk standard kommer att avstå från systematisk användning av sådana metoder. Samhällen och grupper med en etisk standard motsvarande de som systematiskt använder doping i idrott kommer dock att använda dessa interventioner och nå en praktiskt användbar effekt.

³⁴ <http://newsoffice.mit.edu/2014/illuminating-neuron-activity-3-d-0518>

5 Försvarsmaktens perspektivplan 2013

Detta avsnitt relaterar innehållet i denna rapport till avsnittet om neurovetenskap på sidan 29 av Försvarsmaktens perspektivplan (2013).

Vi använder samma definition av neurovetenskap som i perspektivplanen: neurovetenskap är ”*vetenskap om nervsystemets uppbyggnad och funktioner*”. En skillnad är att perspektivplanen poängterar att autonoma system och artificiell intelligens (AI) kommer att vara tillämpningar av neurovetenskap. När neurovetenskapen i framtiden har kommit fram till en kvantitativ, sammanhängande och vetenskapligt grundad förklaring till nervsystemets uppbyggnad och funktioner kommer denna troligen att kraftigt påverka både artificiell intelligens och datorarkitektur. När vi väl förstår principen för hur man kan bygga en maskin med människolik intelligens är det dock inte säkert att hjärnan kommer att vara modellen som vi försöker efterlikna. Datorvetenskapen kan mycket väl utveckla neurovetenskapliga förklaringar så att vi kan bygga datorer som är lika intelligenta som hjärnan men mycket effektivare och bättre anpassade till tillverkningsteknik och befintlig mjukvara. Flygindustrin inspirerades utan tvivel av fåglars flygförmåga men när principen för fåglars flykt förklarades byggde vi inte flygplan som liknar fåglar utan utvecklade mer effektiva tekniker som är bättre anpassade till mänskliga behov och industriell förmåga. Vetenskapliga förklaringar av hjärnans funktion kommer utan tvivel att bli startskottet för en dramatisk utveckling av datorer och datorvetenskap men det är idag svårt att förutse denna utveckling eller identifiera de utvecklingslinjer som kommer att bli viktigast framöver.

Historiskt och i nuläget är kunskapen om hjärnan en viktig inspirationskälla för artificiell intelligens (AI) men den neurovetenskapliga kunskapen räcker idag inte för att konstruera maskiner med mänsklig eller övermänsklig intelligens. Artificiella neuron nät är det mest direkta försöket att bygga AI enligt neurovetenskapliga principer men som framgår av avsnitt 2 reflekterar dessa algoritmer inte alla funktioner i biologiska neuron nät. De senaste fem årens renässans inom artificiella neuron nät (Deep learning) bygger på årtal av envist experimenterande med beräkningsmetoder snarare än på teori eller insikter från neurovetenskap. Eftersom det i 2014 års teknisk prognos tas fram en separat rapport om AI (Gisslén, 2014) behandlar vi inte AI i denna rapport.

Perspektivplanen nämner även kognitiva datorer som en (framtida) tillämpning av neurovetenskap. Neurovetenskap har alltid varit en inspiration till datorarkitektur och även till marknadsföring av datorer och mikroprocessorer. Den första generationen av datorer kallades till och med för ”elektroniska

hjärnor³⁵, när man vill förklara vad de nya apparaterna gjorde. Dator och chiptillverkare har då och då återvänt till den neurovetenskapliga analogin när de vill framhålla att nya produkter kan bli grunden till människolik intelligens. Detta gäller speciellt när man bygger datorer eller processorer med många parallellt arbetande beräkningsenheter. Sådana så kallade paralleldatorer³⁶ är en lovande väg till ökade datorprestanda men är också notoriskt svåra att programmera effektivt³⁷. Moderna exempel på paralleldatorprodukter är Qualcomm's *neuromorphic chip*³⁸ och IBMs forskning på ett *neurosynaptic chip*³⁹ och *kognitiva beräkningar*⁴⁰ (Modha m.fl., 2011) där fokus i det senare fallet är på ett komplett paket av lösningar för att effektivt kunna programmera neuroinspirerad hårdvara. Troligvis är det Darpas satsning SyNAPSE och genombrotten för bildanalys med Deep learning (Gisslén, 2014) som har påverkat Qualcomm och IBM att satsa på produktutveckling som kan ligga till grund för systematisk tillämpning av artificiella neuronnät. En annan drivande faktor är problemen med energieffektivitet och kylning av dagens mikroprocessorer.

Hasler och Marr (2013) hävdar att det i dag är tekniskt möjligt att bygga hårdvara som liknar hjärnans arkitektur och presenterar en vägkarta för framtida utveckling där tidsskalan beror på kommersiella drivkrafter. Detta ämne är utan tvivel intressant att följa och kan bli mycket viktigt i framtiden även om det idag mer ser ut som tillämpad datorvetenskap snarare än tillämpad neurovetenskap.

³⁵http://www.vintagecomputer.net/electronic_brain/Radio%20Electronics%20March%201949%20The%20Electronic%20Brain.pdf

³⁶ <http://www.technologyreview.com/featuredstory/526506/neuromorphic-chips/>

³⁷ <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2006/EECS-2006-183.pdf>

³⁸ <http://www.qualcomm.com/media/blog/2013/10/10/introducing-qualcomm-zeroth-processors-brain-inspired-computing>

³⁹ <http://www.modha.org/papers/012.CICC1.pdf>

⁴⁰ www.research.ibm.com/cognitive-computing/

Bevakningsbehov

Givet slutsatserna i sektion 4 och de relativt långa tidsrymderna för de prognoser som anges under punkterna T1, T2, ... finns det inte något trängande behov av att intensivt övervaka neurovetenskap med tanke på de tillämpningar som diskuteras i denna rapport. Artificiell intelligens har stor betydelse för många viktiga områden inklusive försvar och säkerhet. Vi föreslår att inverkan av utvecklingen inom neurovetenskap bevakas inom ramen för kontinuerlig och sammanhållen kunskapsuppbyggnad och kunskapstillämpning inom artificiell intelligens. Med hänsyn till nuläget inom neurovetenskap som det reflekteras i denna rapport är en rimlig nivå att vart fjärde år genomföra en kortare övervakande studie på samma nivå som den som rapporteras här. För att möjliggöra detta och för att ha kontinuerlig förmåga att bedöma teknikmöjligheter och ge stöd i dessa frågor bör det på FOI fortsatt finnas åtminstone 1-2 forskare med grundkunskaper i neurovetenskap. Det finns dock inte något behov av att investera i medicinsk specialistkompetens på den nivå som finns till exempel på Karolinska institutet utan den nuvarande kompetensnivån på FOI kan underhållas genom de regelbundna uppdaterande studier som rekommenderas här.

6 Förkortningar

Förkortning	Betyder på svenska†	Betyder på engelska†
AI	Artificiell intelligens	Artificial Intelligence
BCI	Hjärna-Dator gränssnitt	Brain-Computer Interface
DARPA	-	Defense Advanced Research Projects Agency
MHz	En miljon svängningar per sekund	-
MIT	-	Massachusetts Institute of Technology
T	Tekniktrend	-
Metoder som läser av hjärnans tillstånd		
EEG	Elektroencefalografi	Electroencephalography
ERP	Händelserrelaterad signal (i EEG)	Event-related potential
MEG	Magnetoencefalografi	Magnetoencephalography
fMRI	Funktionell magnetresonanstomografi	Functional magnetic resonance imaging
fNIRS	Funktionell infraröd spektroskopi	Functional near-infrared spectroscopy
Metoder för att påverka hjärnan		
tDCS	Transkraniell elektrostimulering	Transcranial direct current stimulation
TMS	Transkraniell magnetfältstimulering	Transcranial magnetic stimulation
TUS	Transkraniell ultraljudsstimulering	Transcranial ultrasound stimulator

†Vad förkortningen betyder på engelska anges i fall då detta är användbart för informationssökning. Översättning till svenska anges bara då detta är meningsfullt.

7 Referenser

- Arsenault, J.T., Rima, S., Stemmann, H., Vanduffel, W., 2014. Role of the Primate Ventral Tegmental Area in Reinforcement and Motivation, 2014, Current Biology, i kommande utgåva.
- Bavelier, D., Levi, D.M., Li, R.W., Dan, Y., Hensch, T.K., 2010. Removing Brakes on Adult Brain Plasticity: From Molecular to Behavioral Interventions. Journal of Neuroscience 30, 14964–14971.
- Berger, T.W., Hampson, R.E., Song, D., Goonawardena, A., Marmarelis, V.Z., Deadwyler, S.A., 2011. A cortical neural prosthesis for restoring and enhancing memory. Journal of Neural Engineering 8 (4): 046017.
- Bennet, E., Waltz, E. Counterdeception: Principles and Applications for National Security, 2007. Artech House.
- Blümich, B., 2008. The incredible shrinking scanner: MRI-like machine becomes portable. Scientific American, november 2008, p. 68-80.
- Boland, R. 2008. Army uses advanced systems to understand what soldiers know. Signal. Fairfax, VA.: Armed Forces Communications and Electronics Association.
- Bond, C.F., DePaulo, B.M., 2006. Accuracy of deception judgments. Personality and social psychology Review 10, 214–234.
- Brem, A.-K., Fried, P.J., Horvath, J.C., Robertson, E.M., Pascual-Leone, A., 2014. Is neuroenhancement by noninvasive brain stimulation a net zero-sum proposition? NeuroImage 85, 1058–1068.
- Brunel, N., Hakim, V., Richardson, M.J., 2014. Single neuron dynamics and computation. Current Opinion in Neurobiology 25, 149–155.
- Bystritsky, A., Korb, A.S., Douglas, P.K., Cohen, M.S., Melega, W.P., Mulgaonkar, A.P., DeSalles, A., Min, B.-K., Yoo, S.-S., 2011. A review of low-intensity focused ultrasound pulsation. Brain Stimulation 4, 125–136.
- Chi, R.P., Snyder, A.W., 2012. Brain stimulation enables the solution of an inherently difficult problem. Neuroscience Letters 515, 121–124.
- Clark, V.P., Coffman, B.A., Mayer, A.R., Weisend, M.P., Lane, T.D.R., Calhoun, V.D., Raybourn, E.M., Garcia, C.M., Wassermann, E.M., 2012. TDCS guided using fMRI significantly accelerates learning to identify concealed objects. NeuroImage 59, 117–128. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.11.036
- Coffman, B.A., Clark, V.P., Parasuraman, R., 2014. Battery powered thought: Enhancement of attention, learning, and memory in healthy adults using transcranial direct current stimulation. NeuroImage 85, Part 3, 895–908.

- Cotman, C.W., Berchtold, N.C., 2002. Exercise: a behavioral intervention to enhance brain health and plasticity. *Trends in neurosciences* 25, 295–301.
- Deisseroth, K., Feng, G., Majewska, A. K., Miesenbock, G., Ting, A., Schnitzer, M. J., 2006. Next-Generation Optical Technologies for Illuminating Genetically Targeted Brain Circuits, *Journal of Neuroscience* 26 (41): 10380–6.
- Eggebrecht, A.T. m. fl., 2014. Mapping distributed brain function and networks with diffuse optical tomography, *Nature Photonics*, i kommande utgåva.
- Farah, M.J., Hutchinson, J.B., Phelps, E.A., Wagner, A.D., 2014. Functional MRI-based lie detection: scientific and societal challenges. *Nat Rev Neurosci* 15, 278–278.
- Ferrari, M., Quaresima, V., 2012. A brief review on the history of human functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) development and fields of application. *NeuroImage* 63, 921–935.
- Gisslén, L., Artificiell Intelligens, 2014. FOI rapport FOI-R--3919--SE
- Graybiel, A.M., Smith, K.S., 2014. How the brain makes and breaks habits. *Scientific American*, 310, Issue 6.
- Hameroff, S., Trakas, M., Duffield, C., Annabi, E., Gerace, M.B., Boyle, P., Lucas, A., Amos, Q., Buadu, A., Badal, J.J., 2013. Transcranial Ultrasound (TUS) Effects on Mental States: A Pilot Study. *Brain Stimulation* 6, 409–415.
- Hasler, J., Marr, B., 2013. Finding a roadmap to achieve large neuromorphic hardware systems, *Frontiers in Neuroscience*, 7, doi: 10.3389/fnins.2013.00118.
- Horvath, J.C., Carter, O., Forte, J.D., 2014. Transcranial direct current stimulation: five important issues we aren't discussing (but probably should be) | *Frontiers in Systems Neuroscience*, 24, 24 January 2014.
- Ilieva, I., Boland, J., Farah, M.J., 2012. Objective and subjective cognitive enhancing effects of mixed amphetamine salts in healthy people. *Neuropharmacology* 10, 496-505.
- Iliff, J.J., Wang, M., Liao, Y., Plogg, B.A., Peng, W., Gundersen, G.A., Benveniste, H., Vates, G.E., Deane, R., Goldman, S.A., Nagelhus, E.A., Nedergaard, M., 2012. A Paravascular Pathway Facilitates CSF Flow Through the Brain Parenchyma and the Clearance of Interstitial Solutes, Including Amyloid β . *Science Translational Medicine* 4, 147ra111.
- Kay, K.N., Naselaris, T., Prenger, R.J., Gallant, J.L., 2008. Identifying natural images from human brain activity. *Nature* 452, 352–355.
- Kahneman, D., 2011. Thinking fast and slow. Macmillan.
- Knopfel, T., Akemann, W., 2010. Nanobiotechnology: Remote control of cells. *Nat Nano* 5, 560–561. doi:10.1038/nnano.2010.163

Lai M., Lombardo M. V., Chakrabarti B., Ecker C., Sadek S. A., Wheelwright S. J., et al. (2012a). Individual differences in brain structure underpin empathizing–systemizing cognitive styles in male adults. *Neuroimage* 61 1347–135410.

Lai, M.-C., Lombardo, M.V., Chakrabarti, B., Ecker, C., Sadek, S.A., Wheelwright, S.J., Murphy, D.G.M., Suckling, J., Bullmore, E.T., Baron-Cohen, S., 2012b. Individual differences in brain structure underpin empathizing–systemizing cognitive styles in male adults. *NeuroImage* 61, 1347–1354.

Lee, T., Cai, L. X., Lelyveld, V. S., Hai, A., Jasanoff, A., (2014). Molecular-Level Functional Magnetic Resonance Imaging of Dopaminergic Signaling, *Science*, 2014, i kommande utgåva.

Legon, W., Sato, T.F., Opitz, A., Mueller, J., Barbour, A., Williams, A., Tyler, W.J., 2014. Transcranial focused ultrasound modulates the activity of primary somatosensory cortex in humans. *Nat Neurosci* 17, 322–329.

Levasseur-Moreau, J., Brunelin, J., Fecteau, S., 2013. Non-invasive brain stimulation can induce paradoxical facilitation. Are these neuroenhancements transferable and meaningful to security services? *Frontiers in Human Neuroscience* 7.

Lipps, D.B., Galecki, A.T., Ashton-Miller, J.A., 2011. On the Implications of a Sex Difference in the Reaction Times of Sprinters at the Beijing Olympics.

Luber, B., Lisanby, S.H., 2014. Enhancement of human cognitive performance using transcranial magnetic stimulation (TMS). *NeuroImage* 85, Part 3, 961–970.

McCabe, S.E., Knight, J.R., Teter, C.J., Wechsler, H., 2005). Non-medical use of prescription stimulants among US college students: prevalence and correlates from a national survey. *Addiction* 100 (1), 96–106.

McKinley, R.A., McIntire, L., Bridges, N., Goodyear, C., Weisend, M.P., 2013. Acceleration of image analyst training with transcranial direct current stimulation. *Behavioral Neuroscience* 127.

Modha, D.S., Ananthanarayanan, R., Esser, S.K., Ndirango, A., Sherbondy, A.J., Singh, R., Cognitive Computing. *Communications of the ACM*, Vol. 54 No. 8, 62-71.

Niu, W., Zang, T., Zou, Y., Fang, S., Smith, D.K., Bachoo, R., Zhang, C.-L., 2013. In vivo reprogramming of astrocytes to neuroblasts in the adult brain. *Nat Cell Biol* 15, 1164–1175.

Paez-Gonzalez, P., Asrican, B., Rodriguez, E., Kuo, C.T., 2014, Identification of distinct ChAT neurons and activity-dependent control of postnatal SVZ neurogenesis, *Nature Neuroscience*, i kommande utgåva.

Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F., Merabet, L.B., 2005. The plastic human brain cortex. *Annu. Rev. Neurosci.* 28, 377–401.

- Prevedel, P. et al., 2014. Simultaneous whole-animal 3D imaging of neuronal activity using light-field microscopy, *Nature Methods*, i kommande utgåva.
- Potter, M.C, Wyble, B., Hagmann, C.E., McCourt, E.S., 2013. Detecting meaning in RSVP at 13 ms per picture. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76, Issue 2, pp 270-279.
- Rao, R., 2013. *Brain-Computer Interfacing: An Introduction*, Cambridge University Press.
- Reinhart, R.M., Woodman, G.F., 2014. Casual control of medial-frontal cortex governs electrophysiological and behavioral indices of performance monitoring and learning. *J. Neuroscience*, 34, 4214-4227.
- Royal D. Findings for National survey of distracted and drowsy driving attitudes and behavior: 2002. U.S. DOT NHTSA. 2003.
- Rudenko, A., Dawlaty, M.M., Seo, J., Cheng, A.W., Meng, J., Le, T., Faull, K.F., Jaenisch, R., Tsai, L.-H., 2013. Tet1 Is Critical for Neuronal Activity-Regulated Gene Expression and Memory Extinction. *Neuron* 79, 1109–1122.
- Sale, A.B., Nicoletta Maffei, Lamberto, 2014. Environment and Brain Plasticity: Towards an Endogenous Pharmacotherapy. *Physiological Reviews* 94, 189–234.
- Sanei, S., Chambers, J., 2007. *EEG signal processing*. John Wiley & Sons, Chichester, England; Hoboken, NJ.
- Sehm, B., Ragert, P., 2013. Why non-invasive brain stimulation should not be used in military and security services. *Frontiers in Human Neuroscience* 7.
- Sheffield, M.E.J., Best, T.K., Mensh, B.D., Kath, W.L., Spruston, N., 2011. Slow integration leads to persistent action potential firing in distal axons of coupled interneurons. *Nature Neuroscience* 14, 200–207.
- Smith, S.L., Smith, I.T., Branco, T., Hausser, M., 2013. Dendritic spikes enhance stimulus selectivity in cortical neurons in vivo. *Nature* 503, 115–120.
- Snyder, A., 2009. Explaining and inducing savant skills: privileged access to lower level, less-processed information. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364.
- St. John, M., D.A. Kobus, J.G. Morrison, and D. Schmorow. 2004. Overview of the DARPA Augmented Cognition technical integration experiment. *International Journal of Human–Computer Interaction* 17(2), 131-149.
- Tyler, W.J., 2012. The mechanobiology of brain function. *Nat Rev Neurosci* 13, 867–878.
- Van Praag, H., 2009. Exercise and the brain: something to chew on. *Trends in Neurosciences* 32, 283–290.

Vetter, P., Smith, F.W., Muckli, L., 2014, Decoding Sound and Imagery Content in Early Visual Cortex, *Current Biology*, i kommande utgåva.

Young, L., Camprodon, J.A., Hauser, M., Pascual-Leone, A., Saxe, R., 2010. Disruption of the right temporoparietal junction with transcranial magnetic stimulation reduces the role of beliefs in moral judgments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, 6753–6758.

Har vi alla egentligen fotografiskt minne, absolut gehör och blixtsnabb kalkyleringsförmåga? Går det att frigöra denna dolda förmåga genom att manipulera hjärnan? Det hävdar den australiske forskaren Allan Snyder och hans team vid Centre of the Mind i Sydney. Air Force Research Lab i USA har visat att bildanalytiker får upp till 25 % bättre förmåga att upptäcka mål i radarbilder om deras hjärnor stimuleras med likström. Universitetet i Washington demonstrerade år 2013 hur en persons vilja kan läsas av en hjärnskanner och via en dator och en magnetbestyckad huva tvinga en annan person att utföra den viljestyrda handlingen. Vad blir konsekvenserna av ny teknik för att läsa och styra tankar? Hur kommer vi till exempel att påverkas av den nya vågen av hjärnskanningsbaserade lögn-detektorer som redan finns på marknaden? Det är lätt att både ryckas med och skrämmas av alla möjligheter men det är viktigt att förstå att hjärnan radikalt skiljer sig från våra tekniska system vilket gör att det finns skarpa gränser för hur den kan integreras med teknik.

Människohjärnan är individens och samhällets viktigaste instrument för utveckling och överlevnad. Neurovetenskap är den grundläggande vetenskapen om hjärnan. Driven av parallell utveckling inom informationsteknik, bioteknik och sensorer pågår en explosiv utveckling inom neurovetenskap. Denna rapport sammanfattar kortfattat kunskapsläget, lyfter fram färskta genombrott och identifierar trender som kan leda till omvälvande nya tillämpningar samtidigt som vi diskuterar fundamentala begränsningar. Fokus är på teknik grundad i neurovetenskap som kan påverka friska individer, samhälle samt försvar och säkerhet.