

Mänsklig förstärkning: Statusrapport 2022

BRITTA LEVIN, PER-ANDERS OSKARSSON,
SUSANNA NILSSON



Britta Levin, Per-Anders Oskarsson, Susanna
Nilsson

Mänsklig förstärkning: Statusrapport 2022

Titel	Mänsklig förstärkning: Statusrapport 2022
Title	Human performance enhancement: Status report 2022
Rapportnr/Report no	FOI-R--5409--SE
Månad/Month	12
Utgivningsår/Year	2022
Antal sidor/Pages	37
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Försvarsmakten
Forskningsområde	Ledningsteknologi
FoT-område	Ledning och MSI
Projektnr/Project no	E716595
Godkänd av/Approved by	Christian Jönsson
Ansvarig avdelning	Ledningssystem

Bild/Cover: Bild genererad med AI applikationen DALL-E 2

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Avancerad teknik och autonoma system kommer att ha en större roll i framtida militära operationer, men människan kommer trots detta att även fortsatt att ha en viktig roll. Inom området mänsklig förstärkning (eng. human enhancement) studeras tekniker och metoder vars syfte är att förbättra människans förutsättningar att agera och lösa uppgifter. Rapporten redovisar en inventering av tillgängliga metoder för att mäta fysisk såväl som kognitiv prestation med särskilt fokus på bärna system. Inventeringen omfattar system för att mäta fysiologiska och psykofysiologiska parametrar samt teknik och möjligheter med icke-invasiva system för att registrera hjärnaktivitet. Rapporten redogör kortfattat för deltagandet i internationella samarbeten inom HPE-området. Ett resonemang förs kring möjligheterna till förstärkning med hjälp av teknik för visualisering såsom förstärkt verklighet. Rapporten avslutas med en diskussion där bedömningen är att kontinuerlig insamling av fysiologiska data från individer i fält kan bidra med information som är relevant för individen själv såväl som beslutsfattare på olika nivåer. Detta förutsätter att olika typer av data kombineras och att de sensorer och algoritmer som används är anpassade till ändamålet. Att mäta och presentera resultat är en sak, men att dra slutsatser och göra förutsägelser om framtida prestation är något helt annat. Det är tydligt att ytterligare forskning och utveckling är motiverad för att stödja både operationella och träningsrelaterade behov.

Nyckelord: mänsklig förstärkning, AR, BCI, mänsklig optimering, HPE, HPO, scenario, fysiologisk mätning.

Summary

Although advanced technology and autonomous systems will play greater role in future military operations, the human still have an important role. In the field of human enhancement, techniques and methods are studied with purpose to improve human performance on the battlefield. The report contains an inventory of available methods for measuring physical and cognitive performance with a particular focus on wearable systems. The inventory includes systems for measurement of physiological and psychophysiological parameters as well as technology and possibilities with non-invasive brain computer interfaces. The report briefly describes the participation in international collaborations within the HPE area. There is also a discussion on the potential for human augmentation by means of visualization technology, such as *augmented reality*. The report ends with a summarizing discussion on the assessment that continuous registration of physiological data from individuals, in field settings, can contribute with information that is relevant to the user as well as to decision makers at different levels. A prerequisite is that different types of data are combined and that the sensors and algorithms are tailored to the purpose. However, collecting and presenting results is one thing, the ability to draw conclusions and make predictions about future performance is quite another. It is clear that further research and development is warranted to support both operational and training needs.

Keywords: human enhancement, AR, BCI, human optimization, HPE, HPO, scenario, physiological measurement.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Bakgrund.....	7
1.2	Definition av mänsklig förstärkning.....	8
1.3	Översikt genomförd verksamhet.....	8
2	AR-gränssnitt	10
2.1	Användning av AR	10
2.2	Interaktion i AR	10
2.3	AR:s potential för mänsklig förstärkning.....	11
3	Inventering av fysiologiska mätsystem.....	13
3.1	Översikt förekommande system	13
3.2	Mätparametrar	16
3.3	Betydelsen av kontext.....	16
4	Resonemang kring användbarhet.....	17
4.1	Validitet	17
4.2	Formfaktor.....	17
4.3	Hantering	18
4.4	Kostnad.....	18
5	Tekniker för icke-invasiva BCI.....	19
5.1	Elektroencefalografi (EEG).....	19
5.2	Funktionell nära-infraröd spektroskopi (fNIRS)	22
5.3	Magnetencefalografi (MEG)	23
5.4	Hybridsystem - EEG och fNIRS.....	23
6	Tillämpningar av BCI	24
6.1	Estimering av trötthet med EEG	24
6.2	Estimering av mental arbetsbelastning med EEG.....	25
6.3	Estimering av emotion, mental arbetsbelastning och stress.....	25
6.4	EEG för anpassning av arbetsbelastning	26
6.5	EEG för skrivande på virtuellt tangentbord.....	26
6.6	Stöd för rörelsehindrade	27
7	Diskussion	28
	Referenser.....	30
	Appendix 1 Definition av validitet och reliabilitet.....	33
	Appendix 2 Format för sammanställning av mätsystem	35

1 Inledning

Militära operationer ställer stora krav både på människan och på de system som människan har att interagera med. Även om det framtida slagfältet i ökad utsträckning baseras på avancerad teknik och autonoma system kommer människan fortsatt att ha en tydlig roll. Det pågående kriget i Ukraina visar hur ny teknik, såsom drönare, snabbt har anammats och fått stor betydelse, inte minst för att den taktiska användningen anpassats över tid. Likväl är det människor, soldater och officerare som hanterar systemen, lägger in koordinater, styr drönare, söker relevant information i kamerabilderna och genomför analyser.

När stridens förutsättningar på dylika sätt förändras över tid kommer människans fysiska såväl som kognitiva förmåga och flexibilitet att vara värdefulla tillgångar. Begreppet *mänsklig förstärkning* (eng. human enhancement) avser tekniker och metoder som syftar till att förbättra människans förutsättningar att verka och öka möjligheten till att lösa förekommande uppgifter.

1.1 Bakgrund

Tekniska framsteg inom områden såsom bioteknik, materialteknik, biomedicin, biomekatronik, bioinformatik, beräkningskapacitet och artificiell intelligens (AI) skapar nya möjligheter till förstärkning. I det korta perspektivet ses hur miniatyrisering och trådlös överföring av data har ökat användbarheten för teknik som är avsedd att nyttjas utanpå såväl som inuti kroppen. I det längre perspektivet finns stora förväntningar på möjligheter till förstärkning med den forskning och teknik som ännu är i sin linda. Bland teknik som har potential att nyttjas i det korta perspektivet ses registrering och analys av olika typer av kontinuerliga fysiologiska data.

Användbarhet och nytta med insamling av fysiologiska parametrar har diskuterats i olika konstellationer. I MCDC-samarbetet 2019-2022¹, som var riktat mot mänsklig förstärkning, konkluderades att fysiologisk monitorering har potentiella militära tillämpningar. Det ansågs bland annat att prestationsmått och hälsostatus, som överförs i realtid från enskilda soldater, kan ge information som är användbar för den enskilde individen såväl som för olika ledningsnivåer och medicinsk personal. Möjligheten att få tillgång till korrekta och tillförlitliga data försvåras dock av de ofta hårda och varierande förhållanden som råder i fält, vilket ställer specifika krav på datainsamlingssystemen. Det är därför av intresse att få grepp om det rådande utvecklingsläget – vilka typer av system förekommer på marknaden och hur är deras fältmässighet? En annan viktig del är klagörande av behovet i sig – vilka uppgifter är tänkta att genomföras, av vem och under vilka förutsättningar?

Andra tekniker med potential att nyttjas i det korta perspektivet är olika former av neurala gränssnitt. Icke-invasiva metoder mäter hjärnans aktivitet via sensorer på skallbenets utsida medan de invasiva metoderna baseras på att elektroder, eller matriser med elektroder, och mikrochips planteras in i hjärnan. De invasiva metoderna kan både mäta svagare signaler än icke-invasiva och direkt komma åt att registrera aktiviteten i enskilda neuroner. Utvecklingen har gått framåt och förväntas fortsätta, inte minst med tanke på möjligheterna med artificiell intelligens. På samma sätt som för fysiologisk monitorering är det därför av intresse att göra ett nedslag i det rådande marknads- och forskningsläget.

Föreliggande dokument utgör en statusrapportering för den verksamhet som bedrivits i projekt *Human performance enhancement* (HPE) under 2022.

¹ Deltagande i Multinational Capability Development Campaign (MCDC) pågick i två omgångar. Verksamheten under 2021-2022 tillkom delvis för att följa upp och arbeta vidare med resultaten från åren 2019-2020 "*Human Performance Enhancement and Optimisation HPE/HPO*".

1.2 Definition av mänsklig förstärkning

Mänsklig förstärkning är samlingsnamnet för tekniker och metoder som är till för att bibehålla eller öka nivån på mänsklig prestation. Begreppet är brett och omfattar dels användningen av teknik för att förändra människans kapacitet till nivåer som överträffar normala biologiska funktioner, dels metoder för att nå och upprätthålla prestation och förmåga under operativ stress (UK DCDC, 2021). Tanken med förstärkning är att den ska finnas tillgänglig när den behövs – den behöver således inte vara permanent. Mänsklig förstärkning kan delas in i två delområden, *HPE* (eng. Human Performance Enhancement) och *HPO* (eng. Human Performance Optimization).

Delområde HPE inkluderar teknik som har potential att öka mänsklig prestation utöver det biologiskt normala. Det handlar således om sätt att skapa nya och utökade förmågor genom yttre, såväl som inre, modifikation av kroppens struktur och funktion genom exempelvis kirurgi, genetik, farmakologi, nervstimulering, implantat, exoskelett och proteser. Delområde HPO omfattar strategier för att öka prestationen inom det som anses normalt för populationen genom exempelvis urval, utbildning, träning, nutrition, vila, läkemedel och ledarskap. Potentialen att förstärka förväntas vara betydligt högre med HPE jämfört med HPO, samtidigt som HPE-tekniker och metoder generellt sett är mer invasiva och därmed förenade med större risker och etiska begränsningar.

Tekniken kan appliceras utanpå kroppen (icke-invasiv, extern), såsom olika varianter av buren teknik, eller inuti (invasiv, intern), såsom implantat. Exempel på extern teknik är förstärkt verklighet (eng. augmented reality, AR) och exoskelett. Dessa tekniker anses ingå dels för att de bärs på/mot kroppen, dels för att de interagerar med människan på ett integrerat sätt. Ett motoriserat exoskelett är designat för att fungera i samklang med människans rörelser, vilket exempelvis inte optiska sensorer gör. På liknande sätt presenterar AR-tekniken hela tiden symboler och objekt som ändrar sig beroende på individens orientering och position i relation till omvärlden.

1.3 Översikt genomförd verksamhet

Årets verksamhet har som tidigare år haft två huvudsakliga fokusområden, dels omvärldsbevakning med inriktning mot framtida möjligheter metoder och tekniker inom området, dels undersökning av vad som är möjligt att genomföra i närtid. Specifikt har årets verksamhet ägnats åt inventering av metoder med potential att mäta fysisk såväl som kognitiv prestation. Arbetet har bland annat omfattat:

- Resonemang om möjligheter med förstärkt verklighet (eng. Augmented Reality, AR), vilket beskrivs i kapitel 2. Det har även genomförts ett examensarbete (Faltin, 2022) som utforskade möjliga sätt att visuellt representera positioner på avstånd för att stödja i navigeringsuppgifter.
- Inventering av burna system för att mäta fysiologiska och psykofysiologiska parametrar, vilket beskrivs i kapitel 3 följt av ett resonemang om tillämpbarhet i kapitel 4. Verksamheten ingår som en del i ansatsen till att utveckla mätmetodik för att värdera resultatet av mänsklig förstärkning.
- Inventering av teknik och möjligheter med icke-invasiva BCI (eng. brain computer interfaces), vilket beskrivs i kapitel 5 och kapitel 6. Arbetet baserades på en litteraturstudie över området.
- Fortsatt genomgång av etiska och legala ramverk med bäring på området. En del i detta var deltagande i den virtuella workshopen *Brain-Machine and Related Neural Interface Technologies: Scientific, Technical, Ethical, and Regulatory Issues* som hölls den 22 till 23 september 2022. Workshopen fokuserade på varianter av BCI och de etiska frågor som förknippas med den framväxande tekniken och dess möjligheter.

- Bidrag till rapport inom det tri-lateral samarbetet mellan Kanada, Nederländerna och Sverige (Landman m.fl., 2022). Rapporten är en sammanställning av den verksamhet som genomförts under hela samarbetet – bland annat ingår redovisning av en studie och det seminarium om metoder för att kvantifiera kopplingen mellan fysisk och kognitiv belastning som hölls 2021. Studien handlar om hur typ av fysisk aktivitet och dess intensitet kan inverka både negativt och positivt på den kognitiva prestationen. Rapporten resonerar även om möjligheter till att nyttja denna kunskap i syfte att förbättra mänsklig prestation.

Deltagande i internationella samarbeten har bidragit till omvärldsbevakning, scenario-framtagande samt nya möjligheter till analys av mänsklig prestation och inkluderar:

- MCDC-samarbete inom området mänsklig förstärkning med titeln *Human Performance Modification (HPM) (HPE/HPO #2) -Augmenting Warfighter Strength, Survivability and Resilience in All Operational Environments*. Projektet påbörjades 2021 och var planerat att pågå till och med 2022. Kriget i Ukraina ledde dock till att Tyskland behövde se över, och prioritera om, sitt nyttjande av kritisk nyckelpersonal. En del i detta var att minska sitt deltagande i olika internationella samarbeten, vilket innebar att de helt drog sig ur HPM. Eftersom Tyskland stod för projektledningen, och med bara ett halvår kvar av projektet, bedömdes det svårt för någon annan att ta över och fortsätta driva arbetet. Allt arbete med HPM frystes därför i sin befintliga status den 15 juli 2022.
- NATO HFM RTG 319 med titeln *“Measuring the Cognitive Load on the Soldier”*. Syftet är att komma fram till fungerande metoder för värdering av soldatens kognitiva status i kognitivt utmanande situationer. Arbetet har pågått sedan 2019 och är nu i sitt slutskede med avrapportering (NATO-rapport) planerad till halvårsskiftet 2023. Arbetet omfattar:
 - Identifiering och genomgång av studier där olika mått på kognitiv belastning använts.
 - Analys av den metodik som använts i de utvalda studierna enligt ett antal förutbestämda kriterier.
 - Framtagning av scenarier som beskriver ett antal typsituationer i vilka den avstutne soldaten verkar. Scenarierna kommer att användas för bedömning av metodernas och måttens validitet och applicerbarhet i fält.

En mer utförlig beskrivning av arbetet återfinns i Statusrapport Mänsklig förstärkning 2021 (Levin, 2021).

- Det trilateral samarbetet mellan Kanada (DRDC, Toronto Research Centre), Nederländerna (TNO, Department of Human Performance, Soesterberg) och Sverige (FOI, Linköping och Umeå) med titeln *PA 2017-01 the Interaction between Physical and Cognitive Performance* påbörjades 2018 och avslutades 2022. Målet med samarbetet var att underlätta och förbättra kunskapsutbytet mellan länderna. Verksamheten utgick från en gemensam insats för att förbättra stridskrafterns prestation genom att utveckla en metodik (inklusive mått och modeller) för att minimera framtida fysisk, kognitiv och mental belastning. Som en del i detta har det påbörjats en insats för att ta fram en handledning för mätning av fysisk och kognitiv prestation i fält.

2 AR-gränssnitt

AR, eller förstärkt verklighet, kan beskrivas som en teknik för att förstärka en individs förmåga. Syftet med AR är att skapa en illusion om att virtuella bilder sömlöst blandas med verkligheten (Billinghurst, Clark & Lee, 2015). Azuma (1997) ställde upp tre kriterier för att ett system skulle klassificeras som AR: att det kombinerar verklighet med virtuella inslag; att det är interaktivt i realtid; och att det registreras i 3D. Syftet med dessa kriterier var att definitionen av AR inte skulle begränsas till specifika tekniker, utan allt från huvudburna displayer till handhållna enheter kan kategoriseras som AR-system så länge de uppfyller de ovanstående kriterierna. Definitionen pekar inte heller specifikt ut visuella gränssnitt, utan även AR-system baserade på ljud eller haptik ingår i definitionen.

2.1 Användning av AR

De flesta definitioner eller beskrivningar av AR tar avstamp i det virtuella kontinuumet som beskrivs av Milgram och Kishino (1994), där AR är ett steg på skalan från det som är helt verkligt till det som är helt virtuellt. Detta gör att jämförelser ofta görs med VR-system (eng. Virtual Reality). VR-teknik används i hög grad idag i olika simulatorer och för spel och träning, medan AR än så länge inte har haft samma kommersiella utbredning. Detta beror på flera faktorer varav tekniska utmaningar är en stor del. I synnerhet krävs väldigt noggrann positionering och s.k. tracking (för att fästa den virtuella bilden i en punkt i verkligheten), då det är väldigt lätt för en människa att uppfatta små felmappningar mellan den virtuella och den verkliga världen (Billinghurst, Clark & Lee, 2015). För exempelvis enklare navigeringsapplikationer fungerar dock relativt rudimentär grafik i form av pilar och kartrepresentationer tillräckligt väl, vilket har gjort att det finns flera exempel på just den här typen av AR-system. Levin m.fl. (2021) ger fler exempel på tillgängliga AR-tillämpningar.

AR-tekniken bidrar till mänsklig förstärkning genom att den förstärker omgivningen med exempelvis information, vilket resulterar i en förmågehöjning hos individen. En förutsättning för att AR ska kunna fungera på detta sätt är att tekniken uppnår nödvändig funktionalitet och mognadsnivå. De svårigheter som finns idag handlar dels om positionering av användaren gentemot sin omgivning, dels om möjligheten att skapa djup och realism i den virtuella informationen som överlagras. Det förstnämnda löses med olika metoder, exempelvis genom magnetiska trackers, pappersbaserade markörer eller med lokalisering baserad på GPS eller spårning med utgångspunkt från användarens position (Billinghurst, Clark & Lee, 2015). De flesta kommersiella AR-systemen idag (som Magic Leap² och HoloLens³) har också alla en begränsning i hur väl de fungerar utomhus, dels beroende på positioneringsfrågan, dels beroende på svårigheten att se virtuell information i genomskinliga displayer i dagsljus utomhus.

2.2 Interaktion i AR

Ytterligare en utmaning inom AR-området (och till viss del VR-området) handlar om hur användaren ska interagera med den virtuella informationen. Till skillnad från andra, mer väletablerade, tekniker (som datorer som har fönster, menyer, ikoner och pekare som alla är intuitiva metaforer för det virtuella innehållet) saknar AR etablerade metaforer som beskriver hur det virtuella gränssnittet ska tolkas och hur interaktionen kan ske (Billinghurst, Clark & Lee, 2015). För att designa AR-upplevelser krävs att relationen mellan objekt i den virtuella och den verkliga världen definieras (MacIntyre, 2002). Inom AR har detta bland annat gjorts genom att fysiska objekt (attrapper) motsvarande de virtuella har skapats för att användaren ska kunna manipulera objekten. När det gäller

² <https://www.magicleap.com/en-us/>

³ <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

information som inte rör den fysiska representationen behövs inte detta extra steg utan då måste andra typer av metaforer för interaktionen skapas. Hur ska en överlagrad termisk bild manipuleras? I exempelvis HoloLens används fingrarna och olika typer av knip och pek-gester för att exempelvis förstora eller förminska, eller dra i skalor. Med denna typ av interaktion skulle således en termisk bild kunna manipuleras (för att öka eller minska transparens, intensitet etc.) med en pek-och-svep, eller knip-och-dra gest.

Faltin (2022) utforskade möjliga sätt att visuellt representera positioner på avstånd för att stödja i navigeringsuppgifter. Studiens tekniska AR-lösning baserades på en handhållen surfplatta där symbolik för att stödja vid avståndsuppfattning utvärderades. Målsättningen var att skapa intuitiva symboler där användaren snabbt ska få en uppfattning om ett objekts relativa avstånd. Objekten i fråga var på ett sådant avstånd att de inte kunde uppfattas utan tekniska hjälpmedel och således behövde symbolen förmedla avståndet. Resultatet visade att när flera olika djupledtrådar användes i symbolen förbättrades avståndsbedömningen.

2.3 AR:s potential för mänsklig förstärkning

AR har stor potential som teknik för att stärka mänsklig förmåga på flera områden. Då den mest förekommande applikationen av AR fokuserar på att förstärka användarens synfält, är det främst studier av visuell AR som återkommer i litteraturen.

En uppgift som är kognitivt belastande, och där AR visat sig fungera för att förstärka mänsklig förmåga, är navigering eller mer precist uttryckt, som hjälpmedel för att underlätta för människor att hitta vägen (eng. wayfinding). Kim m.fl. (2015) redovisar resultat från en studie där användare fått leta sig fram till brytpunkter i ett sjukhus med hjälp av AR. Utvärderingen visade att användningen av AR signifikant minskade användarnas kognitiva arbetsbelastning och tiden det tog för dem att hitta rätt. Även Zhang m.fl. (2021) har studerat hur AR kan användas för att stärka mänsklig förmåga genom att reducera den mentala arbetsbelastningen i navigeringsuppgifter då AR underlättar skapandet av s.k. kognitiva kartor av omgivningen.

Kaplan m.fl. (2020) genomförde en metaanalys av XR⁴-baserad träning och kom fram till att det inte fanns några skillnader i effekt avseende träningsresultat (dvs. på utförarnas prestationer efter träning) mellan att genomföra träningen med mer traditionella metoder eller med hjälp av XR-teknik. Detta motiverar användning av XR-teknik då den i många fall möjliggör träning som annars är kostsam eller svår att genomföra.

Ett område där AR nyttjas för att stärka mänskliga operatörers förmåga är inom visuell inspektion av exempelvis byggnader och andra konstruktioner, där det vanligaste sättet att säkerställa status på konstruktionen är att en människa visuellt undersöker ytorna. Den vanliga inspektionen kan med hjälp av AR förstärkas genom överlagring av komplex information (som mätningar på bakomliggande strukturer, sensordata etc) direkt på strukturen som utvärderas i användarens synfält (Wang m.fl., 2021; Ballor m.fl., 2019).

På liknande sätt kan AR användas för att överlagra till exempel termiska sensorbilder och andra signaturer direkt i användarens synfält för att underlätta observation och identifikation av exempelvis fordon, människor och vapen. Ett exempel på militär användning av AR är IVAS (eng. Integrated Visual Augmentation System), som Microsoft utvecklat tillsammans med US Army. Liksom många andra applikationer (t.ex. den för visuell inspektion som beskrivs i Ballor m.fl.) bygger IVAS⁵ på Microsoft HoloLens, men där det genom utförlig användarmedverkan från US Army under utveckling skapats ett betydligt mer ruggat och militärt anpassat system för att förstärka soldatens förmåga i fält genom möjlighet att se relevant information direkt överlagrad på omgivningen (Bach, 2021).

⁴ XR är en förkortning för *extended reality*, vilket inkluderar både AR- och VR-teknik (se t ex Levin m.fl., 2021)

⁵ <https://www.peosoldier.army.mil/Program-Offices/Project-Manager-Integrated-Visual-Augmentation-System/>

Användning av bildförstärkare är inom den militära domänen inget nytt, men på senare år har denna teknik ytterligare förstärkts med nya förmågor. ARTIM (eng. Augmented Reality Tactical Interface Module) är en modul som kan förse en valfri bildförstärkare med symbolik och information från ett BMS (eng. Battle Management System) (Thermoteknix, 2022). På detta sätt kan det användas för att förstärka användarens situationsmedvetenhet, och det marknadsförs i första hand som en HUD (eng. Head-Up Display), snarare än ett AR-system, även om den information som presenteras kan knytas till rörliga positioner i synfältet. I nuläget kan ARTIM förse med symbolik från BMS:et ATAK (eng. Android Team Awareness Kit) eller dess civila variant CivTAK⁶.

⁶ <https://www.civtak.org/>

3 Inventering av fysiologiska mätsystem

Burna fysiologiska mätsystem förekommer i många varianter, alltifrån enkla sensorer till avancerade skräddarsydda system med kapacitet att mäta många olika parametrar. Utvecklingen har gått framåt – inte minst på grund av den stora mängden enkla och relativt billiga enheter som har blivit tillgängliga på grund av senare års sport- och hälsotrender. Idag erbjuder den kommersiella marknaden ett överflöd av relativt billiga datainsamlingsenheter i form av handledsburna sportklockor – en utveckling som möjliggjorts genom miniatyrisering av sensorer och olika sätt att trådlöst överföra data för vidare analys och presentation.

Validiteten och reliabiliteten (begreppen definieras i Appendix 1) hos dessa billiga system är dock ofta något oklar, eftersom tillverkarna i regel inte redovisar vare sig tester eller de beräkningsalgoritmer som ingår. Betydelsen av noggrannhet och validitet i detta sammanhang beror dock av tillämpningen. Fysiologiska parametrar som är tänkta att användas för medicinska ändamål, såsom triage, diagnosticering eller som underlag för medicinsk behandling, kräver en helt annan noggrannhet och validitet än de data som är avsedda att användas av den glada motionären.

Militära tillämpningar ställer särskilda krav på den materiel som används – inte minst sett till anpassning mot den många gånger oförlåtande omgivande miljön. När det gäller burna system behöver hänsyn tas till ergonomi/formfaktorn såväl som till integration och interaktion med individen själv och annan buren utrustning. Det är därför av intresse att få reda på hur andra länder/organisationer har hanterat dessa aspekter och i vilken utsträckning som användningen av buren utrustning för fysiologisk registrering tagits i bruk internationellt sett.

MCDC-samarbetet för perioden 2019-2020 (HPO/HPE) tog sig an dessa frågor och hade som ambition att genomföra en översyn av fysiologiska mätsystem samt hur dessa nyttjades för militära tillämpningar. Den initiala inventeringen var riktad mot etablerade kommersiella system såväl som andra unika satsningar. Det konstaterades att de kommersiella systemen (oavsett komplexitet och kvalitet) i regel inte uppfyllde de militära behoven, vilket hade initierat olika nationella ansatser för att utveckla egna skräddarsydda system. Detta översynsarbete följdes upp med en fördjupad inventering under MCDC-samarbetet för åren 2021-2022⁷, vilken kort redovisas i detta kapitel.

3.1 Översikt förekommande system

Den inventering av fysiologiska mätsystem som genomfördes i MCDC-samarbetet under åren 2021 till 2022 syftade till att få en övergripande insikt om vilka system som fanns eller som var på väg att utvecklas. Tanken var att samla in och dokumentera information om förekommande system för att ha som underlag för vidare analys med avseende på tillämpbarhet för militära applikationer. Med tanke på samarbetsgruppens begränsade storlek var inte ambitionen att åstadkomma en komplett inventering av hela marknads-sortimentet för fysiologiska mätsystem. Förväntningen var dock att den information som samlades in skulle vara tillräcklig för att komma fram till vilken funktionalitet som fanns tillgänglig och vilken kvalitet som systemen hade – detta för att komma fram till vad som saknas, dvs. förmåge- eller behovsgapet.

⁷ Deltagande länder och organisationer var förutom Sverige (FOI), Finland (FDRA), Österrike (MoD), Nederländerna (MoD/TNO), Tyskland (MoD, Fresenius Universitet), Danmark (MoD), Polen (NATO MILMED COE) och Schweiz (MoD).

Inventeringen omfattade både skanning av marknaden utgående från sökningar på internet och andra underlag i form av egen tidigare erfarenhet av, eller kännedom om, olika system. Uppgifter om systemen delades in i tre områden: allmän information, parametrar och egenskaper. Till allmän information räknades uppgifter såsom benämning på systemet, tillverkare, kort beskrivning, kända för- och nackdelar samt bilder.

För att underlätta inventeringen skapades en Excel-fil med en flik för vart och ett av de tre områdena. Flikarna förseddes med förutbestämda kolumner vars rubriknamn och hjälptext informerade om vilken sorts innehåll som förväntades. Avsikten var att styra upp ifyllandet genom att tillhandahålla ett strukturerat format, men samtidigt undvika att begränsa valmöjligheten genom redan färdiga svarsalternativ. En komplett beskrivning av formatet ses i Appendix 2.

Inventeringen visade att det fanns många olika typer av teknik, allt från enkla enheter med enstaka sensorer, system med ett fåtal sensorer, etablerade fysiologiska monitorerings-system (med kapacitet att mäta ett flertal parametrar med större tillförlitlighet) till olika former av koncept. Det huvudsakliga syftet med koncepten var att demonstrera nya möjligheter med teknik i form av ny funktionalitet och händelsekedjor – ambitionen var inte nödvändigtvis att ansatserna skulle resultera i fungerande system eller produkter. Med händelsekedja avses att beskriva och modellera vad olika aktörer gör, vilken typ av information som skapas och hur densamma är tänkt att röra sig i systemet, allt för att komma fram till vilka krav som ska ställas inför en realisering.

Inventeringen hämmades av att den information som efterfrågades i många fall inte var lätt tillgänglig. Många system utvecklas också i rask takt med nya versioner varför associerade uppgifter endast har begränsad livslängd. En ytterligare svårighet kopplad till detta var konfigurationshanteringen, eftersom det i vissa studier inte framgick exakt vilken modell som använts. För enkelhetens skull refereras hela denna flora av teknik härnäst i rapporten till som *system*. Totalt identifierades 98 system, men 27 exkluderades på grund av svårigheten att få fram tillräckligt med information för sammanställningen. Sett till antal sensorer och komplexitet kunde systemen kategoriseras enligt nedanstående punkter vars fördelning redovisas i Figur 1:

- Enkla enheter med enstaka sensorer – realiseras på ett antal olika sätt inklusive ring buren på ett finger, öronsnäcka och elektronisk patch (både engångsbruk och återanvändningsbara patchar förekommer). Exempel på enstaka sensor är en patch för att mäta kortisol som är framtagen av Stanford University⁸.
- System med ett fåtal sensorer – realiseras i regel genom smarta klockor (ofta refererat till som pulsklocka). Som exempel på kommersiella produkter ses Fitbit⁹, Garmin¹⁰ och Polar¹¹.
- Monitoreringssystem – refererar till mer etablerade system som mäter ett antal fysiologiska parametrar och som i regel uppnått högre TRL¹². Dessa system använder ofta en bröstplacerad enhet som kan vara ansluten till ett bröstband. Ett exempel på dylikt monitoreringssystem är Equival¹³.
- Koncept – motsvarar system som endast uppnått låg TRL.
- Loggfunktioner – omfattar generiska system för loggning av data och specifika system för loggning av omgivningsparametrar.
- Applikationer – det förekom *appar* som kunde behandla data från ett större antal olika bärbara enheter.

⁸ <https://news.stanford.edu/2018/07/20/wearable-device-measures-cortisol-sweat/>

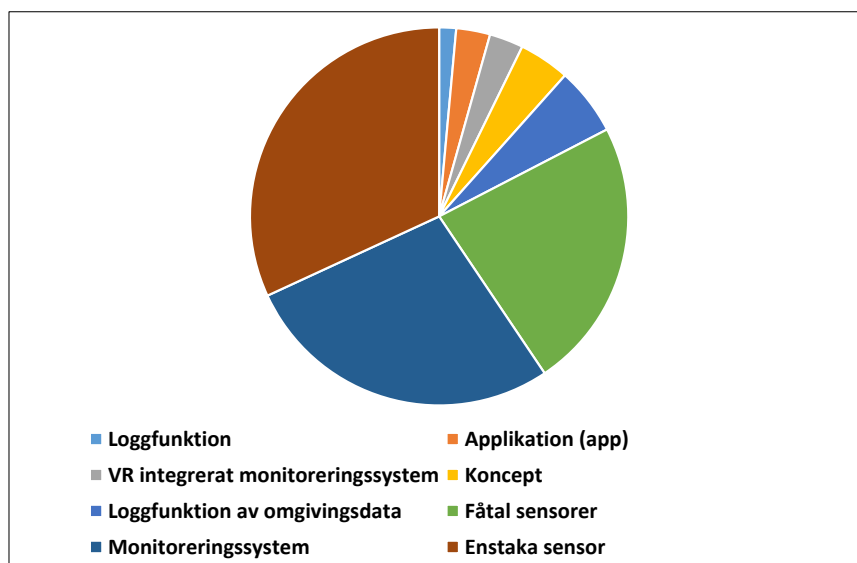
⁹ <https://www.fitbit.com/global/se/products/smartwatches>

¹⁰ <https://www.garmin.com/sv-SE/>

¹¹ <https://www.polar.com/sv/>

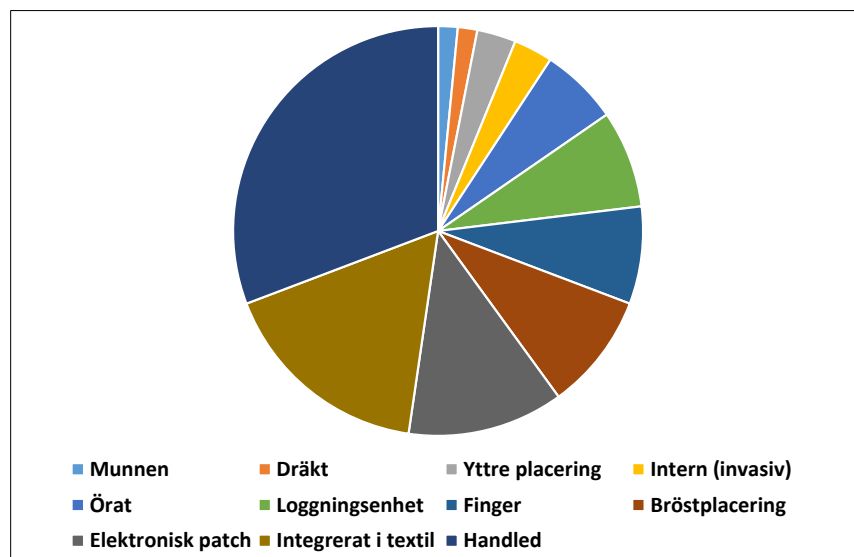
¹² Med TRL avses Technology Readiness Level (sv. teknikmognad)

¹³ <https://equivital.com>



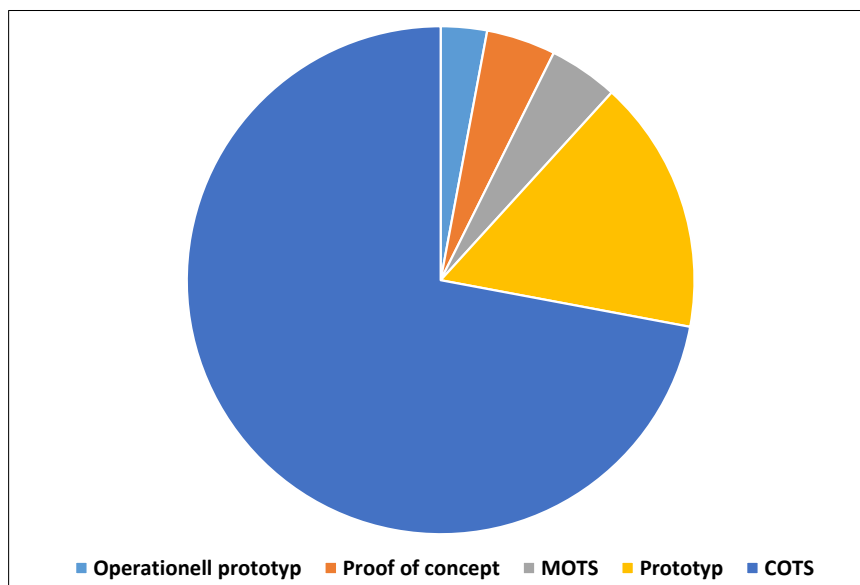
Figur 1. Översikt över inventerade system sett till antal sensorer och komplexitet.

Burna system behöver placeras där sensorerna har bäst möjlighet att fånga den data som avses registreras. I takt med miniaturiseringen har nya alternativ utkristalliserats, vilket både syns i den framväxande floran av smarta klockor och de nya innovativa lösningarna i form av elektroniska patchar, öronenheter och fingerburna ringar som tillkommit på marknaden. Ambitionen att integrera sensorer och annan funktionalitet i textilier är fortsatt stor. Figur 2 illustrerar den variation som förekommer sett till systemens placering relativt användarens kropp.



Figur 2. Översikt över inventerade system sett till placering i relation till kroppen. I vissa fall är mätenheten (sensorn) och dess associerade teknik nära knuten till en viss placering på kroppen, vilket i bilden motsvaras av mun, öra, finger och bröstplacering. Placering på handled utgörs företrädesvis av smarta klockor. Teknik som är integrerad i textil består i många fall av smarta skjortor. Elektronisk patch och loggningsenhet kan förekomma på olika ställen. Yttre placering refererar till teknik vars placering är odefinierad.

Figur 3 redovisar fördelningen mellan proof-of-concept, prototyper och färdigutvecklade kommersiella system. Sammanställningen kan tolkas dels som att det finns en stor andel system med hög TRL, åtminstone från tillverkarnas synvinkel, dels som att det är mycket på gång som ännu befinner sig på en låg TRL.



Figur 3. Fördelning av inventerade system sett till kommersiellt utvecklingsläge. COTS och MOTS står för Commercial- respektive Military-Off-The-Shelf.

3.2 Mätparametrar

Inventeringen av mätparametrar var fördelad på tre kategorier: fysiologiska data, förflyttning och position samt omgivningsförhållanden. En utförlig sammanställning av mätparametrarna kan ses i Appendix 2. Mätparametrarna utgör grunden för de mått eller företeelser som är av intresse att mäta, men säger inte så mycket var och en för sig. Kontinuerlig fysiologisk mätning kommer heller inte att ge alla svaren, utan behöver kompletteras med självskattnings och olika typer av kontextuell information. Många gånger behöver därför mätparametrarna och/eller måtten kombineras för att ge ett relevant och intressant resultat, det är här som nya möjligheter med avancerade statistiska metoder kommer in.

Information som är önskvärd sett till kontexten avsutten soldat omfattar:

- Omgivningsfaktorers inverkan på individen, till exempel hypertermi, köldskador och dehydrering.
- Underlag för att bedöma stridsvärde, till exempel kondition, sömnstatus, skadeläge och mentalt välmående.
- Aktivitetens inverkan på stridsvärde och möjlighet till prediktion utgående från energiåtgång, tillryggalagd sträcka och höjdskillnad, markbeskaffenhet etc.

3.3 Betydelsen av kontext

För att säkerställa att en förstärkning får önskad effekt behöver den kunna kvantifieras. Detta innebär att effekten av förstärkningen måste kunna mätas på ett sätt som fungerar i den aktuella kontexten. Att operationsmiljön många gånger är fysiskt krävande, konstant föränderlig, utsatt för väder och vind samt svårtillgänglig ställer speciella krav på mätmetoderna. Sättet att få grepp om kravbilden är att skapa scenarier som beskriver kontexten såväl som vilka uppgifter som ska utföras.

En del av MCDC-arbetet ägnades också åt att klargöra vilka soldatuppgifter som var aktuella att genomföra, vilka roller som förekom, vilken kontexten var samt vilka mått som förväntades behövas i sammanhanget. Ett antal scenarier togs fram för att tydliggöra behovet och de olika möjliga kontexterna. För mer information om vad som genomfördes i MCDC-samarbetet, se Levin (2021).

4 Resonemang kring användbarhet

Det finns ett antal faktorer som inverkar på systemens användbarhet, såsom validitet (visar mätningen det som avses och fungerar det i den tilltänka kontexten), formfaktor (systemens ergonomiska utformning), hantering (praktikaliteter och komplexitet runt användning) och kostnader (anskaffning och drift). Var och en av dessa faktorer ingick i utvärderingen som redogörs för i kapitel 3 och förtjänar att hanteras separat. Likväl är kombinationen av faktorer av intresse, det går exempelvis att se hur både mätutrustningens validitet och formfaktor påverkar kostnaden och tillgängligheten. Kapitlet resonerar om dessa faktorer och ger exempel från några olika användningsfall.

4.1 Validitet

Att bli försedd med data som inte är pålitlig eller rent av felaktig kan få konsekvenser. I vissa fall är det helt problemfritt eftersom medvetenheten om de faktiska förhållandena finns där och insamlad data kan tas om hand på ett tillrådligt sätt. I andra fall kan det vara helt oacceptabelt. Vad som är lämpligt blir en bedömningsfråga som måste hanteras från fall till fall.

Enkelhet och låg kostnad behöver inte vara associerade med lägre kvalitet, även om det ofta finns en korrelation i det senare fallet. Den egentliga problematiken runt kommersiella system är att tillverkarna inte redovisar tillräckligt med uppgifter för att det ska gå att bedöma kvaliteten. De utvärderingar som förekommer genomförs dessutom sällan med vetenskaplig precision. De studier som ändå utförs hinner heller inte publiceras innan nästa version har kommit ut på marknaden, vilket sammantaget gör det svårt att veta vad dessa produkter presterar.

Ett exempel på frågetecken gällande validitet rör de trender och nya affärsmöjligheter som snabbt plockas upp av den rörliga marknaden för smarta klockor. Att mäta blodets syresättning i en hemmiljö blev populärt under Covid-19-pandemin, och förutom puls mäter senare modeller av smarta klockor även blodets syresättning vid handleden. Metoden är baserad på samma metod som används för fingertoppsmätning (reflectance photoplethysmography, R-PPG-metoden), med tillägget att mätningen kompletteras med maskinlärningsalgoritmer för att öka tillförlitligheten (Zhang & Khatami, 2022). Sedan 2021 varnar amerikanska FDA (eng. food and drug administration) för att dessa klockor inte ger korrekta mätvärden (Zhang & Khatami, 2022). Som nämnts görs få studier på dessa kommersiella produkter, och någon regelrätt extern validering av de mest populära klockornas syresättningsmätning kan därför inte anses vara genomförd. Likväl används funktionaliteten dagligen av miljoner människor.

4.2 Formfaktor

Användbarheten för kroppsnära mätsystem påverkas i stor utsträckning av användarens upplevelse i samband med användning. Att mätsystemen är bekväma, inte stör rörelsemönster och inte påverkar utförandet av uppgifter är avgörande för att data som samlas in ska vara korrekt, relevant och användbar. Tidigare hade exempelvis de flesta smarta klockor tillhörande bröstband med insydda elektroder, vilket möjliggör presentation av mått baserade på EKG. Användning av bröstband är dock förknippat med faktorer såsom skötsel (de behöver tas på och av och tvättas regelbundet) och bekvämlighet (de riskerar att upplevas som obekväma). Detta har lett till att kommersiella smarta klockor istället fokuserar på pulsmätning via handleden.

Erfarenheter från användning av Equivital är att placeringen av datainsamlingsenheten är kritisk för komforten och rörligheten såväl som för interaktionen med buren utrustning i form av kroppsskydd.

4.3 Hantering

Hantering omfattar en mängd olika aspekter alltifrån behovet av förberedelser och infrastruktur till frågor om personlig integritet och cybersäkerhet kopplat till olika användningskontexter. Frågor som individens tillgång till sin egen data rör både lagring över tid och det som kan visas i realtid på en display. Det finns fördelar med att få sin egen data presenterad och kunna agera på den, men det finns också risker. *Bio-feedback* är en etablerad metod där avsikten är att användaren ska kunna lära sig nyttja informationen för att viljemässigt påverka sina kroppsprocesser (Lehrer & Eddie, 2013). Om den data som visas inte är korrekt ökar risken för felaktiga, ibland alltför långtgående, tolkningar.

Den stora nyttan med dagens träningsappar är att de motiverar individer att ge sig ut och motionera och därmed genomföra hälsofrämjande aktiviteter. Det finns dock en tendens att se det som presenteras på en display som en sanning även när det finns en insikt om att data inte är pålitlig. Användare av dessa träningsappar och smarta klockor kan påverkas att ta det som visas på största allvar, vilket i de flesta fall troligtvis är helt bekymmersfritt. Det finns dock en risk med negativ bio-feedback, där individen fäster alltför stor vikt vid de värden som visas och börjar reagera fysiologiskt på ett negativt sätt. Det ställs inga krav på smarta klockor idag, de är inte klassade som medicinska produkter och är därmed inte reglerade. Det har höjts röster för att börja reglera marknaden (Müllerová, P., 2022), inte minst för att det också har uppmärksammats att en del produkter erbjuder analyser som i vissa fall tangerar medicinska diagnoser. Även Zhang och Khatami (2022) diskuterar hur vetenskaplig validering av pulsklockor bör genomföras för att kunna sätta en ny *gold standard* för deras användning på samma sätt som tidigare gjorts för exempelvis syresättningsmätningssutrustning för fingertoppsmätning.

4.4 Kostnad

Lägre kostnad för mätutrustning möjliggör anskaffning och distribution av en större mängd enheter och följaktligen skapas förutsättning för insamling av en större mängd data, vilket i sig bäddar för en mer träffsäker analys. Om det inte är rätt data som samlas in hjälper inte fler datapunkter, vilket kan bli fallet om mätutrustningen är obekvämt eller har dålig passform, som leder till att sensorerna inte hamnar på avsedd plats. Mängden data kan dock i vissa fall vara viktigare än deras exakthet, allt beror på kontext och mål med datainsamlingen. Lägre kostnad betyder i regel sämre kvalitet, men behovet av kvalitet är å andra sidan beroende av kontext och uppgift.

5 Tekniker för icke-invasiva BCI

BCI avser gränssnitt som medger direkt kommunikation mellan hjärnan och teknisk utrustning. Utöver beteckningen BCI används i engelskspråkig litteratur beteckningarna brain-machine interface (BMI), neural-control interface (NCI), direct neural interface (DNI), mind-machine interface (MMI), neurological interface (NI), brain-neural computer interface (BNCI) och brain-neural machine interface (BNMI). En sökning på dessa beteckningar på Google och i litteraturlatabasen Scopus visade att beteckningen BCI utan jämförelse är mest använd, följt av BMI. Wolpaw och Wolpaw definierade 2012 ett BCI som (hämtad från Aricò m.fl., 2016):

a system that measures Central Nervous System (CNS) activity and converts it into artificial output that replaces, restores, enhances or improves natural CNS output and thereby changes the ongoing interactions between the CNS and its external or internal environment

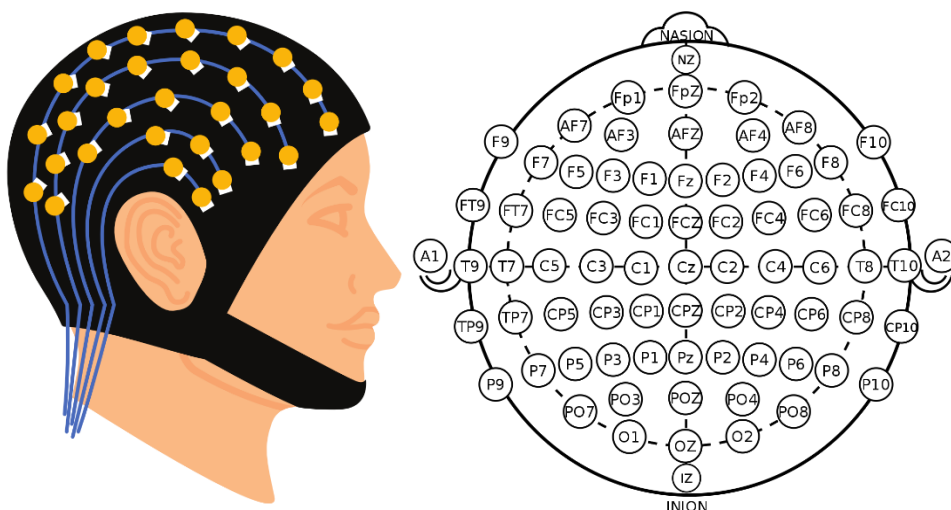
De icke-invasiva metoder för BCI som identifierades i litteraturstudien och genomgången av ledande teknikföretag inom området är elektroencefalografi (EEG), funktionell nära-infraröd spektroskopi (fNIRS) och bärbar utrustning för magnetencefalografi (MEG). Andra tekniker som är aktuella i sammanhanget är elektromyografi (EMG), som används för att registrera signaler som hjärnan skickar till muskulaturen, och elektrookulografi (EOG), som nyttjas för att filtrera bort artefakter orsakade av ögonblinkningar.

Totalt sett identifierades 22 system varav majoriteten var baserade på EEG, i vissa fall kombinerat med rörelsesensor och mätning av ögonrörelser. Tre system använde sig av fNIRS och ett utgjorde en kombination av fNIRS och EEG.

Flerparten av de forskningsstudier av icke-invasiva metoder som redovisas i denna rapport har använt EEG för att mäta hjärnans elektriska aktivitet. För ytterligare inventering och beskrivning av BCI, se Levin m.fl. (2021).

5.1 Elektroencefalografi (EEG)

Elektroencefalografi (EEG) innebär mätning av hjärnans elektriska aktivitet genom elektroder som placeras på utsidan av skallbenet. Vanligen positioneras elektroderna enligt det internationellt standardiserade 10-20 systemet (Figur 4), vilket innebär att avståndet mellan intilliggande elektroder är antingen 10 eller 20 procent av avståndet mellan frambak eller vänster-höger sida av skallen (Trans Cranial Technologies, 2012).



Figur 4. Till vänster schematisk bild av elektroder monterade i headset (bild från Shutterstock). Till höger elektronkonfiguration med 10-20 systemet (fri bild från Wikipedia).

Ett flertal företag tillverkar så kallade EEG-headset (huvor och hjälmar) med elektroder monterade i headsetet, vilket gör att mätningarna är enkla att genomföra. Figur 5 visar ett exempel på headset försett med ett mindre antal elektroder.



Figur 5. Exempel på headset med ett fåtal elektroder (bild från Shutterstock).

En fördel med EEG, jämfört med andra icke-invasiva metoder (se nedan), är att det ger ett direkt mått på processer i hjärnan, istället för ett indirekt mått som ges genom mätning av blodflöde eller metabolisk aktivitet. (Kosti m.fl., 2018). Måtten har hög temporal upplösning (millisekunder). En nackdel är dock att den spatiala upplösningen är relativt låg (centimeter), vilket beror på att avståndet mellan skallbenet och hjärnan verkar som ett spatialt lågpasfilter (Cao m.fl., 2021). Varje elektrod registrerar därmed signaler från ett stort antal neuroner, vilket gör det svårt att bestämma aktivitetens exakta position i hjärnan (Li m.fl., 2022).

Hjärnvågornas uppdelning i frekvensband och deras psykofysiologiska tolkningar, enligt Kosti m.fl. (2018), redovisas i Tabell 1.

Tabell 1. Frekvensband för hjärnvågor och deras psykofysiologiska tolkningar (anpassat från Kosti m.fl., 2018).

Hz	Band	Psykofysiologisk tolkning
1-4	Delta	Medvetlöshet, djup sömn
4-8	Theta	Sömnighet, begränsad medvetenhet
8-12	Alfa	Fysisk och mental avslappning, dock med medvetenhet om vad som händer
13-30	Beta	Vakenhet, aktivt och logiskt tänkande
30-100	Gamma	Högre nivåer av mental bearbetning och kognitiva funktioner. Viktigt för lärande och informationsbearbetning.

Vissa skillnader i beskrivningarna av psykofysiologisk tolkning av frekvensbanden finns mellan olika publikationer, vilket kan förklaras av att vilka aspekter av psykofysiologisk påverkan som står i fokus kan variera beroende på studiernas syfte.

Event-related potential (ERP) är små variationer i EEG-signalen som reflekterar neural aktivitet som kan relateras till olika sensoriska, motoriska eller kognitiva händelser. Inspelning av ERP visar exakt tidpunkt för en neural aktivitet (Gazzaniga m.fl., 2009). Följande komponenter av ERP har analyserats och använts i de studier som sammanfattas i litteraturstudien av He m.fl. (2018):

- Movement-Related Cortical Potential (MRPC) är aktionspotentialer som relateras till rörelser. Enligt He m.fl. (2018) är MRPC den mest frekvent rapporterade neurala komponenten som rapporterats i litteraturen om BMI.
- Event-Related Desynchronization (ERD) observeras vid en minskning i signalstyrkan (främst inom alfa- och betabanden), vilket relateras till rörelserelaterade uppgifter, både utförda och tänkta.
- Steady-State Visual Evoked Potentials (SSVEPs) är relaterade till visuella stimuli, som flimrande ljus. SSVEPs är därmed inte direkt relaterat till rörelser. Frekvensen för SSVEPs är dock relaterat till blinkningsfrekvensen hos visuella stimuli som användaren tittar på, vilket kan utnyttjas vid tillämpningar relaterade till rörelser. Ett exempel på detta är en studie där LED-lampor som blinkade med olika frekvens monterades på en arm på ett exoskelett. Användaren fick då titta på specifika lampor för olika rörelser som han/hon ville att armen skulle utföra.

Enligt Crk, m.fl. (2016) innebär händelserelaterad desynkronisering (eng. event-related desynchronization, ERD) att grupper av neuroner slutar att oscillera (avfyrar i takt). ERD i det undre alfa-bandet är relaterat till ökade uppgiftsrelaterade uppmärksamhetskrav, medan ERD i det övre alfa-bandet är relaterat till aktivitet i det semantiska minnet. Författarna menar därför att ERD kan vara ett bra mått på mental arbetsbelastning vid kunskapsrelaterade arbetsuppgifter.

För att reducera brus och korrelationer mellan sensorerna i EEG-signalen används olika tekniker, filtreringsfunktioner och analysmetoder. Följande användes i de studier som ingick i litteraturstudien av He m.fl. (2018):

- Common Average Referencing
- Linjär regressionsanalys
- Logistisk regressionsanalys
- Linjär diskriminantanalys
- Kalmanfilter
- Sparse discriminant analysis
- Bayesisk klassifikation
- Gaussian mixture model
- Multiple kernel learning
- Random forest
- K-nearest neighbours

Analys och tolkning av signalerna från hjärnan kan göras genom neurala nät som genom maskininlärning lär sig att identifiera variationer i EEG-signalen, vilka kan relateras till specifika känslor, handlingar eller tillstånd. Detta beskrivs bl.a. i Jeong m.fl. (2019).

5.2 Funktionell nära-infraröd spektroskopi (fNIRS)

Funktionell nära-infraröd spektroskopi (fNIRS) är teknik för att mäta hjärnaktivitet med optiska sensorer, så kallade optoder, som använder sig av infrarött ljus (Hong m.fl., 2020). Metoden baseras på mätning av blodets syresättning i hjärnan, vilket ger ett indirekt mått på hjärnans aktivitet. Mätningen sker vanligen med sensorer monterade enligt 10-20-systemet i speciella headset, på motsvarande sätt som de headset med elektroder som används för mätning med EEG. Ett exempel på ett sådant headset visas i Figur 6.



Figur 6. Hitachi ETG4000, headset med optoder för mätning med fNIRS (bild från Wikimedia¹⁴)

Metoden har fått sitt namn av att mätningen görs genom ljus med våglängder i ett spann nära det infraröda spektrumet, 600-1000 nanometer. Det som mäts är hur mycket av ljuset som absorberas av blodets hemoglobin. Eftersom blodets hemoglobin till stor del absorberar ljus nära det infraröda spektrumet, medan det till stor del passerar hud, vävnader och skallens ben, ger metoden en bild av blodflödet och syresättningen vid avgränsade områden i hjärnan. Eftersom blodflödet och syresättningen i hjärnan orsakas av neuronernas aktivitet kan data användas för att tolka hjärnans aktivitet i dessa områden.

En nackdel med metoden är att den ger ett indirekt mått på hjärnans aktivitet, vilket innebär att det finns en fördröjning i signalen, dvs. en fördröjning från att neuroner aktiveras tills blodflödet ökar (Hong, m.fl., 2020). Detta begränsar möjligheterna att i realtid kontrollera extern utrustning, som proteser eller exoskelett. Enligt Cao m.fl. (2021) är fördröjningen flera sekunder. De påpekar dock att metoden har god spatial upplösning, som ligger på millimeternivå.

Vid mätning med fNIRS används olika filtreringsmetoder, bl.a. används lågpasfilter för att ta bort höga frekvenser. Olika typer av filtreringsmetoder används också för att ta bort brus, både brus som skapas genom förändringar i andning och blodtryck och brus som t.ex. skapas av kroppsrörelser som gör att optoderna rör sig. Rekommendationen är dock att brus som beror på störningar i den optiska signalen, som inte är relaterade till hjärnans aktivitet, först elimineras genom filtrering med matematiska metoder. Variationer i omgivande belysning kan också skapa brus, varför belysningen bör hållas så konstant som möjligt (Hong m.fl., 2020).

Biopac fNIR100 är ett headset för mätning med fNIRS i pannan (på frontalloben) med 16 optoder och fyra ljuskällor. Det användes i en studie av Durantin m.fl. (2016). Försöket gjordes för att testa ett Kalmanfilter för filtrering av fNIRS-signalen. Resultaten var lovande för Kalmanfiltret med avseende på klassificering av arbetsminnesbelastning.

¹⁴ Walej (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FNIRS_head_Hitachi_ETG4000_2.jpg), <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

5.3 Magnetencefalografi (MEG)

Magnetencefalografi (MEG) innebär mätning av de magnetiska fält som skapas av hjärnans elektriska aktivitet. Företaget Kernel har utvecklat Flux¹⁵, ett bärbart headset för mätning av hjärnans aktivitet med magnetencefalografi (MEG) med 720 kanaler. De beskriver att det består av optiskt pumpade magnetometrar, vilket ger realtidsåtkomst till hjärnans aktivitet. En fördel med MEG, jämfört med EEG, är att magnetfälten inte utsätts för distorsion vid passage av skallbenet. Headsetet innehåller aktiv magnetisk avskärmning och har ett stort antal kanaler, vilket, enligt Kernel, innebär att det kan användas då användaren rör sig i en normal miljö som inte är magnetiskt avskärmd. Avskärmningen i headsetet är enligt Lebedev och Nicolelis (2017) nödvändig eftersom det magnetfält som skapas av hjärnans aktivitet är i storleksordningen en pikotesla – jämfört med jordens magnetfält som är ca 50 mikrottesla. Enligt Kernel är MEG tillämpbart inom ett flertal områden, t.ex. språk och musik, syn, neurologisk feedback i realtid och behandling av neurologiska sjukdomar.

5.4 Hybridsystem - EEG och fNIRS

De hybridsystem som identifierades i litteraturstudien var huvudsakligen system som kombinerar EEG och fNIRS. Grunden för att kombinera dessa metoder är att EEG har hög temporal upplösning men låg spatial upplösning, medan fNIRS har hög spatial upplösning men låg temporal upplösning. Detta innebär följaktligen att fördelarna från båda teknikerna kan kombineras i ett icke-invasivt system med både hög temporal och spatial upplösning (Li m.fl., 2022). Studier där deltagare har fått utföra och visualisera motoriska uppgifter med hybridsystem som kombinerar EEG och fNIRS har t.ex. uppvisat förbättrad klassificering och precision i signalavkodning, jämfört med användning av endast ett av systemen (Li m.fl., 2022).

En nackdel med hybridsystem är att komplexiteten ökar (Li m.fl., 2022). För att minska komplexiteten har Li m.fl. (2017) föreslagit en metod som bygger på statistisk analys för att identifiera de två fNIRS-kanaler som registrerar högst uppgiftsrelaterad potential och att endast EEG-kanaler i närheten av dessa används av hybridsystemet. Denna metod medförde bl.a. en avsevärd minskning av systemets vikt, kablage samt mindre förberedelsestid före användning.

¹⁵ Beskrivning och bild på Kernel Flux: <https://www.kernel.com/news/announcing-kernel-flux-the-worlds-most-powerful-neural-interface>

6 Tillämpningar av BCI

Tillämpningar av BCI kan delas upp i tre kategorier: aktiva, reaktiva och passiva. *Aktiva tillämpningar* innebär att mätning av hjärnans aktivitet används som kommandon till ett BCI. Det innebär att användaren behöver använda mentala strategier för att aktivt skapa en viss typ av mätbar aktivitet i hjärnan, vilket kan kräva mycket träning. Exempel på aktiva tillämpningar är mätning av motorisk aktivitet för kontroll av proteser. *Reaktiva tillämpningar* innebär att hjärnans aktivitet mäts när användaren exponeras för externa stimuli, t.ex. ljud, bilder, frågor eller smärta. Det innebär att användaren endast behöver fokusera sin uppmärksamhet selektivt mot den information som presenteras, vilket inte kräver mycket träning. Exempel på reaktiva tillämpningar är att användaren fokuserar blicken på en viss punkt, som mäts med blickpunktsregistrering, för att besvara frågor. *Passiva tillämpningar* innebär att hjärnans aktivitet mäts i situationer då användaren inte medvetet påverkar hjärnans aktivitet. Exempel på passiva tillämpningar är mätning av mental arbetsbelastning eller trötthet (Friedrich m.fl. 2021; Hong m.fl., 2020). En skiljelinje kan också dras mellan BCI som återställer funktioner i hjärnan efter en skada och de som förbättrar existerande och normalt fungerande funktioner (Coin & Dubljević, 2020).

De vanligast förekommande typerna av BMI-tillämpningar i litteraturen är stöd för funktionshindrade avseende kontroll av proteser, rullstolar och exoskelett. Både invasiva och icke-invasiva tekniker används för att stödja funktionshindrades kontroll av motordrivna rullstolar och rörelser hos proteser, t.ex. robotarmar (Coin & Dubljević, 2020). En litteraturstudie av He m.fl. (2018), som gjorde en kartläggning av användning av BMI-tekniker för kontroll av benproteser, visade att dessa nästan uteslutande använder EEG-mätningar för att läsa av hjärnans signaler (He m.fl., 2018). Typ av kontroll från ett BMI vid dessa tillämpningar kan indelas i tre nivåer (He m.fl., 2018):

- Högsta nivån. Målet för uppgiften anges, t.ex. gå till dörren.
- Mellersta nivån. Diskreta kommandon ges, t.ex. gå framåt, stanna, sväng vänster.
- Lägsta nivån. Kontinuerlig kontroll av samtliga rörelser.

Tidiga försök med artificiellt seende genom BCI-teknik gjordes redan 1974 genom elektrisk stimulering av cortex på blinda. En fungerande prototyp för blinda skapades år 2000 genom en videokamera monterad på solglasögon. En bild skickades till en dator, som i sin tur skickade data till elektroder fästa i synbarken. Utvecklingen av denna typ av applikation har fortsatt, men år 2020 var det fortfarande inte möjligt att helt återställa normal syn (Coin & Dubljević, 2020). Ett exempel på etablerad BCI-teknik är annars cochleaimplantat som används för att återskapa hörsel. Det första implantatet kom år 1957 och moderna varianter som kan detektera mänskligt tal har funnits sedan 1970-talet (Coin & Dubljević, 2020). I övrigt fokuserar kapitlet på icke-invasiva tillämpningar av BCI.

6.1 Estimering av trötthet med EEG

Jeong m.fl. (2019), från Korea University, har redovisat en studie där det utförts extern mätning av hjärnans elektriska aktivitet med EEG för att estimerar nivåer av trötthet hos tio piloter som genomförde en timmas nattflygning i en flygsimulator. Mätningarna utfördes med ett EEG-headset med 30 kanaler från Brain Products¹⁶. Ögonmuskulaturens aktivitet mättes med EOG, baserat på fyra elektroder, för att filtrera bort de störningar i EEG-signalen som berodde på ögonblinkningar. EEG-data analyserades med ett djupt neuralt nät (deep spatio-temporal convolutional bidirectional long short-term memory network [DSTCLN]).

¹⁶ EEG-headset från Brain Products: <https://www.brainproducts.com/solutions/braincap/>

Under flygningen skattade piloterna sin nivå av vakenhet på Karolinska institutets sömnhetskala (KSS). Analysen visade relativt god överensstämmelse mellan EEG och KSS. För identifikation av två mentala tillstånd (vakenhet, sömnhet) var sambandet 0,87, och för fem nivåer av trötthet (mycket vaken, ganska vaken, varken vaken eller sömnig, sömnig men utan ansträngning för att hålla sig vaken, mycket sömnig) var sambandet 0,69 (mättet på samband var grand-average classification accuracy).

6.2 Estimering av mental arbetsbelastning med EEG

Fan m.fl. (2022) har genomfört en studie där de estimerade mental arbetsbelastning med EEG. Mätningarna gjordes med ett EEG-headset från Emotiv Epoc med 14 gelbaserade elektroder och två referenskanaler, med samplingsfrekvensen 128 Hz. EEG-signalen analyserades med ett neuralt nät. Det skapades också en procedur för automatisk bearbetning av EEG-signalen innan den analyserades av det neurala nätet, vilket enligt Fan m.fl. annars kräver bedömningar av en människa. Med ett generellt tränat neuralt nät (tränat på andra personer än användarna) kunde mental arbetsbelastning på tre nivåer (låg, medel, hög) prediceras med 67 procents säkerhet och med två nivåer (låg, hög) med 83 procents säkerhet. Med ett individuellt tränat neuralt nät (tränat på deltagarna i studien) kunde mental arbetsbelastning med tre nivåer prediceras med 99 procents säkerhet och med två nivåer med 99,8 procents säkerhet. Systemets förmåga att predicera mental arbetsbelastning avsåg samstämmighet mellan mental arbetsbelastning som estimerats med EEG och deltagarnas bedömningar av sin mentala arbetsbelastning på en 9-gradig skattningsskala. Även om prediktionsförmågan var betydligt högre med ett individuellt tränat neuralt nät är det enligt Fan m.fl. (2022) i de flesta fall inte praktiskt tillämpbart att träna ett nät för respektive användare.

Kosti m.fl. (2018) genomförde, i ett samarbete mellan universiteten i Thessaloniki och Aten, en studie som mätte mental arbetsbelastning på mjukvaruutvecklare med EEG. De undersökte hjärnans aktivitet vid två relaterade mentala uppgifter – att förstå kod och att leta fel i kod. Mätningarna gjordes med huvudburen EEG-mätning med 14 elektroder av typen Emotiv Epoc. Analysen visade högre hjärnaktivitet vid förståelse än vid letande av fel, vilket indikerar större svårighet och högre mental arbetsbelastning vid förståelse av kod. Deltagarna gjorde också subjektiva skattningar av svårigheten på uppgifterna. För att omvandla EEG-signalerna till uppskattningar av mental arbetsbelastning användes bl.a. regressionsanalys där deltagarnas subjektiva skattningar användes som beroendevariabel.

6.3 Estimering av emotion, mental arbetsbelastning och stress

Hou m.fl. (2016) beskriver ett försök där de mätte emotion, mental arbetsbelastning och stress med EEG. Mätningarna gjordes med ett headset från Emotive med 14 elektroder. Samtliga tre mått kräver individuell kalibrering för varje deltagare. För detta hade Hou m.fl. (2016) utvecklat en speciell programvara där EEG mättes samtidigt som deltagarna utförde uppgifter.

Emotion kalibrerades genom att respektive deltagare fick lyssna på ljudklipp och med potentiometerreglage på en datorskärm ange hur positivt till negativt de uppfattade ljudet. Både mental arbetsbelastning och stress kalibrerades genom att respektive deltagare fick göra typiska test som skapar mental arbetsbelastning respektive stress och göra subjektiva skattningar av sin mentala arbetsbelastning och sin stressnivå i programvaran. I försöket utfördes troligen kalibreringen av de tre testen med olika deltagare (olika antal deltagare vid respektive kalibrering).

För emotion var det i genomsnitt 50 procent överensstämmelse mellan EEG och de subjektiva skattningarna, dock med stor skillnad mellan deltagarna. EEG-mätning av mental arbetsbelastning kunde korrekt skilja mellan två nivåer av mental arbetsbelastning med 90 procents säkerhet och mellan fyra nivåer med 80 procents säkerhet. EEG-mätning av stress kunde korrekt skilja mellan två nivåer av stress med 86 procents säkerhet, mellan tre nivåer med 75 procents säkerhet och mellan fyra nivåer med 67 procents säkerhet.

Hou m.fl. (2016) presenterade mätningarna med ett gränssnitt som de benämner KogMeter, med vilket dynamisk presentation av samtliga tre mått görs. På skärmen visas respektive mått med konturer av halvcirklar. Färgkodning används för indikering av respektive mått, där grönt innebär låg nivå, orange medelhög nivå och rött hög nivå. Dessutom anges med text under respektive halvcirkel om nivån är låg medel eller hög för mental arbetsbelastning och stress, och positiv, medel eller negativ för emotion.

Eftersom det troligtvis var olika deltagare vid kalibreringen är det oklart om KogMeter faktiskt har testats där EEG samtidigt mäter samtliga tre mått på samma person. Någon senare studie där resultat presenteras med KogMeter kunde inte hittas i litteraturstudien.

6.4 EEG för anpassning av arbetsbelastning

Aricò m.fl. (2016) rapporterar ett försök där de använde EEG-mätning för att genom adaptiv automation anpassa informationssystem för flygledning i förhållande till flygledarnas arbetsbelastning. Försöket genomfördes i en realistisk simulator för flygledning med nio personer som var i slutfasen på sin flygledarutbildning. EEG-signalen registrerades med nio elektroder (information om vilket specifikt EEG-headset som användes saknas). När arbetsbelastningen enligt EEG-mätningarna översteg en viss nivå anpassades informationspresentationen i de system som flygledarna använde. Sammanfattningsvis menar författarna att EEG-mätningarna i stor utsträckning kunde identifiera hög arbetsbelastning som var relaterad till uppgiftens svårighetsgrad, vilket innebar att automationen huvudsakligen anpassades då uppgiftens svårighetsgrad var hög. Detta ledde i sin tur till att deltagarna under uppgifter med hög svårighetsgrad upplevde lägre arbetsbelastning och presterade bättre vid anpassad automation.

6.5 EEG för skrivande på virtuellt tangentbord

EEG kan användas för att skriva på ett virtuellt tangentbord. Tekniken bygger på att en matris med bokstäver blinkar i slumpmässig ordning. Då den bokstav som användaren fokuserar uppmärksamheten på blinkar, genereras en händelserelaterad potential (eng. event-related potential) i EEG-signalen (Farwell & Donchin, 1988).

Garcia m.fl. (2019) rapporterar ett försök med ett EEG-baserat virtuellt tangentbord, BCI-300 speller, där måttet P300¹⁷ användes. I det här fallet registrerades P300 efter att den bokstav som användaren fokuserade blicken på hade blinkat. För beskrivning av BCI-300 speller, se t.ex. Rakotomamonjy och Guigue (2008). Deltagarna i studien av Garcia m.fl. (2019) behövde endast en kort tids träning för att lära sig skriva med tangentbordet. EEG mättes med åtta elektroder, placerade på huvudet enligt 10-20-systemet. Om elektroderna fästes manuellt eller headset med monterade elektroder användes beskrivs inte i studien.

¹⁷ P300 registrerar en positiv händelsebaserad potential, en reaktion med förändring i hjärnaktivitet, som inträffar 300 millisekunder efter att ett stimuli har uppmärksamats.

I studien undersöktes hur mental stress påverkar användningen av tangentbordet. Det gjordes genom att deltagarna fick göra två mentalt belastande sekundäruppgifter samtidigt som de skrev på tangentbordet. Generellt gjorde deltagarna fler fel på skrivuppgiften då de var mentalt belastade genom sekundäruppgifterna. Det var dock några deltagare som inte presterade sämre under mental belastning medan några presterade betydligt sämre, vilket enligt Garcia m.fl. (2019) indikerar relevansen av BCI för anpassning av gränssnitt i förhållande till användarens mentala tillstånd.

6.6 Stöd för rörelsehindrade

Neurologiska gränssnitt för att stödja rörelsehindrade avser t.ex. avläsning av hjärnans signaler för att kontrollera proteser, exoskelett eller rullstolar.

López-Larraz m.fl. (2016) redovisar en studie i vilken EEG användes för att kontrollera ett exoskelett. För registrering av EEG-signalen användes ett headset med 32 elektroder från g.Tec¹⁸ med samplingsfrekvensen 256 Hz. Exoskelettet var konstruerat för att göra det möjligt för en rörelsehindrad person att gå. Det monterades över personens ben och hade tre leder, för höft, knä och fotled. Vid test av exoskelettet med fyra rörelsehindrade personer hade systemet god förmåga att genom EEG-signalen läsa av kommandon till exoskelettet för två av deltagarna (83-100 procent korrekta avläsningar), medan denna förmåga var låg för två av deltagarna (18-84 procent korrekta avkodningar). Endast en av de rörelsehindrade deltagarna lyckades gå tio meter, vilket var testbanans längd. López-Larraz m.fl. (2016) menar dock att testet visade att konceptet att kontrollera ett exoskelett med EEG fungerar.

Donati m.fl. (2016) redovisar en studie med åtta deltagare med förlamning orsakad av ryggmärgsskada, varav sju var fullständigt förlamade. De fick gångträning med stöd av EEG med 16 kanaler och 11 elektroder på skallbenet (utförligare beskrivning av EEG-utrustningen saknas). Träningsprogrammet bestod av flera steg och pågick under cirka ett års tid. Under hela träningsprogrammet användes två strategier för träningen. Först fick deltagarna föreställa sig armrörelser för att anpassa EEG-signalen, vilket gjordes för att de skulle kunna skapa högre nivåers rörelsekommandon som gå och stanna. När de behärskade detta fick de lära sig att använda EEG-signalen för att kontrollera benen på en avatar i en VR-applikation och senare bl.a. ett gångstöd med robotik för att gå på ett löpband och med ett exoskelett. Efter träningsperioden uppvisade deltagarna förbättrad motorisk kontroll, vilket visades genom att det genom EMG gick att mäta viljestyrda muskelsammandragningar i flera muskler nedanför ryggmärgsskadan. De uppvisade också förbättrad sensorisk förmåga, vilket visades genom förbättrad förmåga att uppfatta beröring, vibrationer och förbättrad proprioception (förmågan att uppfatta kroppsdelars position). Dock förbättrades inte förmågan att uppfatta värme eller kyla. Donati m.fl. menar att dessa förbättringar kan tillskrivas plasticitet i både hjärnbark och ryggmärg, där förändringar skapades genom långvarig användning av ett BCI.

¹⁸ g.Tec: <https://www.gtec.at/>

7 Diskussion

Definitionen av mänsklig förstärkning är bred och kan upplevas som spretig samtidigt som den tvärvetenskapliga approachen gör att området tenderar att tangera andra. Detta är dock snarare en styrka och innebär att olika aspekter kan beaktas, som annars riskerar att falla mellan stolarna. Ansatsen lägger en grund för ett mer holistiskt perspektiv som tidigare beskrivits i bland annat Levin m.fl. (2018).

Mänsklig förmåga kan beskrivas i termer av kroppslig och mental förmåga, där många förstärkande tekniker är kopplade till de mänskliga sinnena, varav synen kanske är det mest dominerande för vår omvärldsuppfattning. En av de tekniker som förstärker synen är AR, som kan ses både som ett tekniskt hjälpmedel och en förlängning eller utökning av människans sinne. Genom displayteknik kan omvärlden förstärkas med information som annars är osynlig, exempelvis information om objekt, sensorbaserad information (som exempelvis kamerabilder från värmekameror) eller annan relevant information (som informationslager med markbeskaffenhet knutna till verkliga GPS-koordinater). Istället för att stanna och leta upp denna information kan den överlagras och kontinuerligt uppdateras, direkt i synfältet i realtid när användaren rör sig genom världen.

Även VR bygger till stor del på synen, men här tillkommer för en ännu mer immersiv upplevelse även hörseln då ljud starkt påverkar inlevelseförmågan i virtuella applikationer. Den omedelbara upplevelsen av det som finns i synfältet är dominant och den omedelbara upplevelsen av olika objekt och fenomen kan vara väldigt övertygande, vilket är en av anledningarna till att VR är populärt för spel- och träningsapplikationer. AR ger andra möjligheter genom att symbolik överlagras och kan fås att interagera med och passa in i den fysiska världen. I teorin skulle digitala artificiella objekt i AR kunna utformas på så sätt att de upplevs som intuitiva och som en naturlig del av upplevelsen av omvärlden. Både VR och AR har stor potential sett till simuleringsmiljöer för träning och förberedelser inför olika uppdrag, men det finns även stora möjligheter att använda dessa tekniker för exempelvis återhämtning.

Senare års tekniska framsteg har genererat ett förnyat intresse för området mänsklig förstärkning, som dels riktas mot ett långsiktigt perspektiv med omvärldsbevakning, dels fokuseras mot användning av tekniker och metoder som redan finns tillgängliga. Oavsett perspektiv är det väsentligt att veta vad förstärkningen innebär, hur den är tänkt att fungera, hur den kan bidra till ökad prestation och vilka eventuella risker som kan förekomma i samband med dess användning.

Bedömningen är att kontinuerlig insamling av fysiologiska data från individer i fält kan bidra med information som är relevant för individen själv såväl som beslutsfattare på olika nivåer. Detta förutsätter att olika typer av data kombineras och att de sensorer och algoritmer som används är anpassade till ändamålet. Att mäta och presentera resultat är en sak, men att dra slutsatser och göra förutsägelser om framtida prestation är något helt annat. Det är tydligt att ytterligare forskning och utveckling är motiverad för att stödja både operationella- och träningsrelaterade behov.

Oavsett tidsperspektiv är det viktigt att teknik och metoder för mänsklig förstärkning presterar när de väl tas i bruk. Det är väsentligt både att veta vad förstärkningen innebär och att ha sätt att kvantifiera dess positiva och eventuellt negativa effekter. Detta innebär att det behövs metoder och system som har kapacitet att mäta och värdera effekten av den förstärkning som olika tekniker och metoder kan bidra med. Ett sätt att åstadkomma detta kan vara att nyttja fysiologisk monitorering, men det öppnar också upp för möjligheten att använda tekniker som, åtminstone ännu, är mindre fältmässiga, såsom icke-invasiv mätning av hjärnaktivitet.

En stor del av forskningen och utvecklingen inom BCI-området består av stöd till individer med neurala eller funktionella nedsättningar och fokuserar på till exempel direkt styrning av proteser, rullstolar och exoskelett. Det förekommer dock ansatser till användning av BCI som riktas till individer utan funktionsnedsättning, till exempel, för estimering av trötthet eller för direkt kommunikation med datorer utan att användaren behöver trycka på tangenter eller ge röstkommandon. Den stora potentialen för förstärkning ses dock i de invasiva teknikerna för BCI.

Verksamheten under innevarande år har haft stort fokus på icke-invasiva metoder för att förstärka mänsklig förmåga. Under kommande år planeras detta arbete kompletteras med en fördjupning om utvecklingsläget även för invasiva metoder, i synnerhet inom BCI-området. Oavsett typ av mätmetod tillkommer dock frågeställningar om vad de mätvärden som erhålls faktiskt innebär, hur de kan analyseras och vilka slutsatser som kan dras utifrån insamlad data. För att fördjupa kunskapen om detta krävs vidare studier, exempelvis av vad nya beräknings- och analysmetoder kan tillföra, däribland metoder som klassificeras under AI-paraplyet (exempelvis maskininlärning, neurala nät etc). Utöver metoderna och analysen av insamlad data behöver även de etiska och legala frågeställningarna utredas vidare. Sammantaget är förhoppningen att nå längre gällande hur olika mått och metoder för både insamling och analys kan kombineras på bästa sätt för att nå så stor nytta som möjligt.

Referenser

- Aricò, P., Borghini, G., Di Flumeri, G., Colosimo, A., Bonelli, S., Golfetti, A., Pozzi, S., Imbert, J.-P., Granger, G., Benhacene, R., Benhacene, R., & Babiloni, F. (2016). Adaptive automation triggered by EEG-based mental workload index: A passive brain-computer interface application in realistic air traffic control environment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10 (OCT2016). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00539>
- Azuma, R. (1997) A Survey of Augmented Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, p. 355-385.
- Bach, D. (2021, 8 juni). *U.S. Army to use HoloLens technology in high-tech headsets for soldiers*. Transform. <https://news.microsoft.com/transform/u-s-army-to-use-hololens-technology-in-high-tech-headsets-for-soldiers/>
- Ballor, J. P., McClain, O. L., Mellor, M. A., Cattaneo, A., Harden, T. A., Shelton, P., ... & Mascareñas, D. D. (2019). Augmented reality for next generation infrastructure inspections. In Barthorpe, R. (Eds.) *Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3* p. 185-192. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74793-4_23
- Billinghurst, M., Adrian Clark, A., Lee, G. (2015) A Survey of Augmented Reality, *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction: Vol. 8: No. 2-3*, p 73-272. <http://dx.doi.org/10.1561/11000000049>
- Cao, J., Huppert, T. J., Grover, P., & Kainerstorfer, J. M. (2021). Enhanced spatiotemporal resolution imaging of neuronal activity using joint electroencephalography and diffuse optical tomography. *Neurophotonics*, 8(1) doi:10.1117/1.NPh.8.1.015002
- Coin, A., & Dubljević, V. (2020). The authenticity of machine-augmented human intelligence: Therapy, enhancement, and the extended mind. *Neuroethics*.
- Crk, I., Kluthe, T., & Stefik, A. (2016). Understanding programming expertise: An empirical study of phasic brain wave changes. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 23(1).
- Donati, A. R. C., Shokur, S., Morya, E., Campos, D. S. F., Moioli, R. C., Gitti, C. M., Augusto, P. B., Tripodi, S., Pires, C. G., Pereira, G. A., Rudolph, A., & Nicoletis, M. A. L. (2016). Long-Term Training with a Brain-Machine Interface-Based Gait Protocol Induces Partial Neurological Recovery in Paraplegic Patients. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep30383>
- Durant, G., Scannella, S., Gateau, T., Delorme, A., & Dehais, F. (2016). Processing functional near infrared spectroscopy signal with a kalman filter to assess working memory during simulated flight. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9(JAN2016)
- Faltin, R. (2022) *Augmented Reality for Dismounted Soldier's Situation Awareness - Designing and Evaluating Intuitive Egocentric Depth Perception with Natural Depth Perception Cues*. Linköpings Universitet. LiU-ITN-TEK-A--22/060--SE.
- Fan, C., Hu, J., Huang, S., Peng, Y., & Kwong, S. (2022). EEG-TNet: An End-To-End Brain Computer Interface Framework for Mental Workload Estimation. *Frontiers in Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.869522>
- Farwell, L. A., & Donchin, E. (1988). Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 70(6), 510-523. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(88\)90149-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(88)90149-6)
- Friedrich, O., Racine, E., Steinert, S., Pömsl, J., & Jox, R. J. (2021). An Analysis of the Impact of Brain-Computer Interfaces on Autonomy. *Neuroethics*, 14(1), 17-29. <https://doi.org/10.1007/s12152-018-9364-9>

- Garcia, L., Zak, M., Grenier, C., Hanrio, S., Henry, D., Randriamanantena, R., Semal, C., Andre, J. M., Lespinet-Najib, V., & Ron-Angevin, R. (2019). Is Stress State an Important Factor in the BCI-P300 Speller Performance? I *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: Vol. 11506 LNCS. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20521-8_37
- Gazzaniga, M. S., Ivry, R. B., & Mangun, G. R. (2009). *Cognitive neuroscience - The biology of the mind - International student edition* (3d ed.). W. W. Norton & Company.
- He, Y., Eguren, D., Azorín, J. M., Grossman, R. G., Luu, T. P., & Contreras-Vidal, J. L. (2018). Brain-machine interfaces for controlling lower-limb powered robotic systems. *Journal of Neural Engineering*, 15(2)
- Hong, K.-S., Ghafoor, U., & Khan, M. J. (2020). Brain-machine interfaces using functional near-infrared spectroscopy: a review. *Artificial Life and Robotics*, 25(2), 204–218.
- Hou, X., Liu, Y., Lim, W. L., Lan, Z., Sourina, O., Mueller-Wittig, W., & Wang, L. (2016). CogniMeter: EEG-based brain states monitoring. I *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 9590). https://doi.org/10.1007/978-3-662-53090-0_6
- Jeong, J., Yu, B. W., Lee, D., & Lee, S. (2019). Classification of drowsiness levels based on a deep spatio-temporal convolutional bidirectional LSTM network using electroencephalography signals. *Brain Sciences*, 9(12).
- Kaplan, A. D., Cruick, J., Endsley, M., Beers, S. M., Sawyer, B. D., & Hancock, P. A. (2021). The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis. *Human Factors*, 63(4), p. 706–726. <https://doi.org/10.1177/0018720820904229>
- Kim, M.J., Wang, X., Han, S., & Wang, Y. (2015). Implementing an augmented reality-enabled wayfinding system through studying user experience and requirements in complex environments. *Visualization in Engineering*. 3. P. 1-12. doi:10.1186/s40327-015-0026-2.
- Kosti, M. V., Georgiadis, K., Adamos, D. A., Laskaris, N., Spinellis, D., & Angelis, L. (2018). Towards an affordable brain computer interface for the assessment of programmers' mental workload. *International Journal of Human Computer Studies*, 115, 52-66.
- Landman, A., Binsch, O., Linssen, L., Reinten, J., Hollands, J., Levin, B., Catoire, M., & Hogenelst, K. (2022). *Effects of concurrent and subsequent physical activity on cognitive performance: Theories and a pilot study conducted and discussed within a trilateral project arrangement between Canada, Netherlands and Sweden* (V2023). TNO report 2022 R12309.
- Lebedev, M. A., & Nicolelis, M. A. L. (2017). Brain-machine interfaces: From basic science to neuroprostheses and neurorehabilitation. *Physiological Reviews*, 97(2), 767–837. <https://doi.org/10.1152/physrev.00027.2016>
- Lehrer, P., & Eddie, D. (2013). Dynamic processes in regulation and some implications for biofeedback and biobehavioral interventions. *Applied Psychophysiology Biofeedback*, 38(2), 143–155. <https://doi.org/10.1007/s10484-013-9217-6>
- Levin, B., Nilsson, S., Hermelin, J., Svensson, E., & Stenius, C. (2021). *Teknisk utveckling inom människa-maskininteraktion. Applikationer för framtida Gränssnitt*. FOI-R--5245--SE.
- Levin, B. (2021). *Statusrapport Mänsklig förstärkning 2021*. FOI-R--5271--SE.

- Levin, B., Hedenstierna, C., Hagström, M., Svensson, J., & Hermelin, J. (2018) *Förstärkning av mänsklig förmåga*. FOI-R--4716--SE
- Li, R., Potter, T., Huang, W., & Zhang, Y. (2017). Enhancing performance of a hybrid EEG-fNIRS system using channel selection and early temporal features. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00462>
- Li, R., Yang, D., Fang, F., Hong, K.-S., Reiss, A. L., & Zhang, Y. (2022). Concurrent fNIRS and EEG for Brain Function Investigation: A Systematic, Methodology-Focused Review. *Sensors*, 22(15). <https://doi.org/10.3390/s22155865>
- López-Larraz, E., Trincado-Alonso, F., Rajasekaran, V., Pérez-Nombela, S., del-Ama, A. J., Aranda, J., Minguez, J., Gil-Agudo, A., & Montesano, L. (2016). Control of an ambulatory exoskeleton with a brain-machine interface for spinal cord injury gait rehabilitation. *Frontiers in Neuroscience*, 10(AUG). <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00359>
- MacIntyre, B. (2002) Authoring 3D Mixed Reality Experiences: Managing the Relationship Between the Physical and Virtual Worlds. *ACM SIGGRAPH and Eurographics Campfire: Production Process of 3D Computer Graphics Applications - Structures, Roles and Tools*, Snowbird, UT, June 1-4
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information Systems*, Vol E77-D, No.12 December 1994.
- Müllerová, P. (2022, 10 oktober). Hälsoappar kan göra mer skada än nytta. *Svenska Dagbladet debatt*, <https://www.svd.se/a/P4478z/lita-inte-for-mycket-pa-halsoapparna-skriver-petra-mullerova>
- Rakotomamonjy, A., & Guigue, V. (2008). BCI competition III: dataset II-ensemble of SVMs for BCI P300 speller. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 55(3), 1147–1154.
- Thermoteknix (2022). *Augmented Reality Tactical Interface Module (ARTIM). Augmented Reality (AR) heads-up display system*. Thermoteknix. Hämtad november 2022. Tillgänglig via: <https://www.thermoteknix.com/products/defence-security/artim>. <https://www.thermoteknix.com/products/defence-security/artim>
- Trans Cranial Technologies (2012). *10/20 System positioning – Manual*. https://transcranial.com/docs/10_20_pos_man_v1_0_pdf.pdf
- UK DCDC (2021), *Human Augmentation – The Dawn of a New Paradigm*. UK Development Concepts And Doctrine Centre.
- Wang, S., Zargar SA., & Yuan F-G. (2021) Augmented reality for enhanced visual inspection through knowledge-based deep learning. *Structural Health Monitoring*. 20(1) p. 426-442. doi:10.1177/1475921720976986
- Wolpaw, J., & Wolpaw, E.W. (2012). *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Zhang, Z. and Khatami, R. (2022) Can we trust the oxygen saturation measured by consumer smartwatches? *The Lancet Respiratory Medicine*, Volume 10 (5), p. e47-e48, ISSN 2213-2600, [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(22\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(22)00103-5).
- Zhang, J., Xia, X., Liu, R., & Li, N. (2021) Enhancing human indoor cognitive map development and wayfinding performance with immersive augmented reality-based navigation systems, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 50, ISSN 1474-0346, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101432>.

Appendix 1 Definition av validitet och reliabilitet

När studier och mätningar genomförs är det av högsta vikt att de utformas så att det som avses mätas faktiskt också är det som mäts, och helst att resultaten även blir användbara för mer än det specifika fallet som mäts. I detta sammanhang är begreppen *reliabilitet* och *validitet* viktiga att ta hänsyn till.

Reliabilitet handlar om i vilken utsträckning ett resultat är oberoende av slumpmässiga omständigheter, det vill säga om det går att upprepa samma studie och få samma resultat och komma till samma slutsatser. I kvantitativa studier handlar det om replikerbarhet, vilket innebär att det ska vara möjligt att uppnå samma resultat vid upprepade försök (Silverman, 2014). Replikerbarheten säger dock inte något om sanningshalten i resultatet, bara att det går att upprepa mätningen och få samma resultat. *Validitet*, å andra sidan, säger något om sanningshalten, att resultatet faktiskt stämmer: "*Validity is another word for truth*" (Silverman, 2014, s 21).

Båda begreppen handlar dock om hur väl en metod mäter det den är avsedd att mäta. Reliabilitet rör frågan om repeterbarhet medan validitet är ett mått på om resultatet återspeglar det som mäts. Kirk och Miller (1986) beskriver skillnaden genom följande exempel: En termometer som varje gång den läggs i kokande vatten visar 82 grader ger ett reliabelt, pålitligt, mått (om än ett felaktigt resultat). En termometer som däremot visar mått nära 100 grader (men inte precis samma) varje gång den läggs i kokande vatten har inte reliabilitet (eftersom den inte återger exakt samma värde varje gång). Däremot visar den ett sanningsenligt resultat och är därmed valid.

Validitet kan delas upp i extern och intern validitet. *Intern validitet* handlar om kausala samband, det vill säga hur väl enskilda resultat stämmer med resultatet som helhet. Med andra ord handlar det om i vilken utsträckning en studie kan fastställa ett orsak-verkan samband (Cuncic, 2022). Detta är i hög grad beroende av hur studien är utformad och hur rigoröst metoden följs vid genomförandet. Att etablera intern validitet är viktigt för att säkerställa att resultatet faktiskt är baserat på det som mäts och inte har orsakats av andra faktorer/variabler (t. ex. att i en utvärdering av ett nytt läkemedel säkerställa att det är det testade läkemedlet som har effekt hos patienterna och inte något annat). Intern validitet är inte en antingen eller-fråga utan pekar istället på hur pass säkra resultaten kan anses vara, baserat på hur väl metoden har eliminerat risker för att det är något annat (okontrollerade variabler, eng. *confounding variables*) än det som mäts som påverkat resultaten. Att en studie har hög intern validitet innebär att studiens resultat bara kan härledas till det som har mätts och inte kan förklaras av någon annan ovidkommande variabel.

Extern validitet handlar istället om generaliserbarhet, det vill säga, i hur stor utsträckning resultat från en studie kan generaliseras till andra situationer eller grupper. Till exempel, ett läkemedel som tagits fram i en rigorös studie (där effekten visats ha hög intern validitet) förväntas få samma resultat hos andra patienter med samma sjukdomsbild, men som inte varit en del av studien. Extern validitet är viktig då det innebär att studiens, eller mätningens, resultat kan generaliseras till liknande individer eller populationer, också kallat *populationsvaliditet*. *Ekologisk validitet* handlar om huruvida resultaten kan generaliseras till andra situationer eller omständigheter (Orne & Holland, 1968). För att nå hög validitet skalas så många externa, påverkande variabler som möjligt bort, men detta kan då leda till att situationen där mätningen görs blir konstlad och inte stämmer med en verklig kontext (när stressmätningar exempelvis görs i en laboratoriemiljö är det möjligt att mäta vilka stressorer som påverkat resultatet i och med att andra variabler skalats bort, men resultatet kan då inte nödvändigtvis generaliseras till en naturlig miljö där samma stressor kanske påverkas av andra variabler som skalats bort i laboratoriemiljön). I detta fall saknas ekologisk validitet. I kvalitativa studier talas det också om *transferabilitet*, vilket avser huruvida resultatet kan överföras till situationer med liknande omständigheter (Larsson, 2009).

Referenser:

- Cuncic, A. (2022) *Internal Validity vs. External Validity in Research*
<https://www.verywellmind.com/internal-and-external-validity-4584479> (senast hämtad 2022-12-13)
- Silverman, D. (2014). *Interpreting Qualitative Data*. Sage
- Kirk, J., & Miller, M. L. (1986). *Reliability and validity in qualitative research*. Beverly Hills, CA: Sage
- Larsson, S. (2009). A pluralist view of generalization in qualitative studies. *International Journal of Research & Method in Education*. 32. p. 25-38
 10.1080/17437270902759931
- Orne, M. T., & Holland, C. H. (1968) On the ecological validity of laboratory deceptions. *International Journal of Psychiatry*, 6, p. 282-293

Appendix 2 Format för sammanställning av mätsystem

Kolumnrubrik flik 1, allmän information	Beskrivning/förklaring
Product name/origin	System/produktnamn/ursprung.
Company/Origin	Företagsnamn/tillverkares ursprung.
Type	Typ av system, plattform eller applikation (enstaka sensorer, smarta klockor, etablerade fysiologiska monitoreringssystem, koncept).
Indoor/outdoor	Vilken typ av miljö som den kan användas i (inomhus/utomhus).
MOTS/GOTS/NOTS/COTS/Project/Proof of concept (including TRL)	MOTS (eng. military off the shelf); GOTS (eng. government off the shelf); NOTS (eng. niche/NATO off the shelf); COTS (eng. commercial off the shelf); Project: i det fall det handlar om en verksamhet snarare än en produkt; Proof of concept: När avsikten var att ta fram ett koncept; TRL (eng. Technology Readiness Level).
Developer statement	Från tillverkaren kortfattad beskrivning av systemets funktion/kapacitet. Om det rör sig om ett koncept anges målsättning och sammanfattad beskrivning av projektiden.
Own analysis, pros	Möjlighet att ange noterade fördelar i samband med egen användning av systemet/produkten.
Own analysis, cons	Möjlighet att ange noterade nackdelar i samband med egen användning av systemet/produkten.
Source	Enkel källangivelse till det sammanhang som systemet/produkten har beskrivits/introducerats eller presenterats.
Website	Länk till websida där produkten beskrivs.
Costs	Från tillverkaren angivet inköpspris. Om tillgängligt anges även systemets/produktens anskaffnings- och livscykelkostnad.
Lead Nation (developed; supported?; used?; approved for military use?)	Land som har tagit fram systemet, stödjer dess framtagning, har använt systemet eller godkänt systemets användning.
Used/tested by (knowledge and experience with system)	Land eller organisation som har testat produkten och/eller som har egen erfarenhet av den.
Point of contact (PoC)	I det fall specifik kontaktperson var känd.
Illustrating picture	Illustrativ bild på produkten.

Kolumnrubrik flik 2, parametrar	Beskrivning/förtydligande/ och några exempel på sätt att mäta.
Heart, ECG; HR, HRV, Pulse, etc.	Parametrar kopplat till hjärtat: • Hjärtfrekvens (eng. heart rate, HR). • Hjärtfrekvensens variabilitet (eng. heart rate variability, HRV). Måtten baseras på den elektriska aktivitet som registreras i samband med hjärtats sammandragningar. Den resulterande grafen kallas ett EKG (eng. electrocardiogram, ECG). • Pulsfrekvens. Puls mäts utgående från den förändring i blodvolym som genereras i samband med hjärtslagen på grund av muskulaturens sammandragningar. Smarta klockor registrerar vanligtvis pulsen med hjälp av ljus, dvs. fotopletysmografi (eng. Photoplethysmography, PPG). Beroende på mätmetoder överensstämmer pulsen mer eller mindre väl med HR.
Cardiovascular blood pressure, systolic and diastolic, pulse	Kardiovaskulärt. Blodtryck, systoliskt och diastoliskt.
Temperature, Core, Skin	Parametrar kopplade till temperatur: • Kärntemperatur. Kan mätas med hjälp av ett elektroniskt sensorförsatt piller som sväljs. Den lokala temperaturen registreras allteftersom pillret rör sig genom mag-tarmkanalen. Det förekommer också estimering av kärntemperatur baserat på bland annat hudtemperatur samt mätning med öronsensor. • Hudtemperatur, mäts bl.a. med sensorer mot huden.
Breathing, Rate (BR), Oxygenation	Parametrar kopplade till andning: • Andningsfrekvens (eng. breathing rate, BR). Registreras exempelvis med hjälp av bröstband eller estimeras utgående från EKG. • Syresättning. Ett mått på syremättnad är SpO2, som kan mätas med hjälp av PPG.
Environmental, geographical location, humidity, temperature, toxicology, air pressure, light/darkness, CBRNe,	Omgivningsparametrar som geografisk plats, position, luftfuktighet, temperatur, lufttryck, ljusnivå, toxikologi CBRN med flera. Här förekommer ett större antal potentiella typer av sensorer. Många system är försedda med GPS för registrering av position.
Motion, Body posture, activity, speed, cadence, energy expenditure, etc.	Parametrar kopplade till rörelse: • Kroppsläge, såsom stående, liggande etc., kan estimeras med hjälp av accelerometrar. • Typ av aktivitet. • Förflyttningshastighet kan beräknas utifrån positionsdata. • Kadensen definierar hur ofta foten träffar marken. Måttet används för att ange tempo vid gång eller löpning. • Energiförbrukning, med flera.
Skin (re-)activity, EDA, GSR, etc.	Parametrar kopplade till hud och stressrespons: • EDA (eng. electrodermal activity) . • GSR (eng. galvanic skin response).

Brain activity, EEG, SMR, alpha, theta, etc.	Se kapitel 5.
Vision, gaze (fixation vs saccades), detection of sight, detection of point of gaze fixation	Parametrar kopplade till ögonen: • Blickriktning . • Blinkningar. • Fixering. • Sackader.
Muscle activity, EMG, contraction, relaxation, etc.	Muskelaktivitet, EMG (eng. elektromyografi). Måttet baseras på den elektriska aktivitet som registreras i samband med att musklerna arbetar.
Biochemical, homeostasis; lactate, catecholamine, cortisol, amylase, etc.	Parametrar kopplade till biokemiska markörer och grad av homeostas. • Laktat bildas vid anaerob metabolism . • Katekolaminer är hormoner som dopamin, noradrenalin och adrenalin. • Kortisol är ett steroidhormon . Markörerna används för att indikera olika tillstånd i kroppen såsom effekt av hårt muskelarbete, utmattnings, tecken på stress och stressreaktioner.
Basic rate of data	Frekvens med vilken data registreras.
Literature reference	Referens till artiklar och andra beskrivningar

Kolumnrubrik flik 3, egenskaper	Beskrivning/förklaring
Algorithm	Information om de algoritmer som ingår, till exempel algoritmer som används för att filtrera, analysera och fusionera data.
Duration, on battery	Hur länge som enheten är operativ på batteri.
Connectivity	Infrastruktur, konnektivitet, hur data kommuniceras internt mellan olika delar av systemet såväl som externt.
Database	Var lagras data och hur den fortsatt är bearbetad.
Standard	Om systemet nyttjar någon form av standard, till exempel, HL7FHIR för hantering av medicinska data.
Identification, PID	Hur data kopplas till individen, om informationen är skyddad genom implementering av koder etc.
Authentication, user	Hur access till data sker.
Configurability	På vilket sätt som systemet kan konfigureras.
Quality assessment/validation	Information som underlättar bedömningen av systemets kvalitet, direkta påståenden och länkar till forskningsartiklar.
Connections to other systems	Huruvida systemet kan integreras med andra system/enheter.
Literature reference	Referens till artiklar och andra beskrivningar.

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
164 90 Stockholm

Tel: 08-55 50 30 00
Fax: 08-55 50 31 00

www.foi.se