

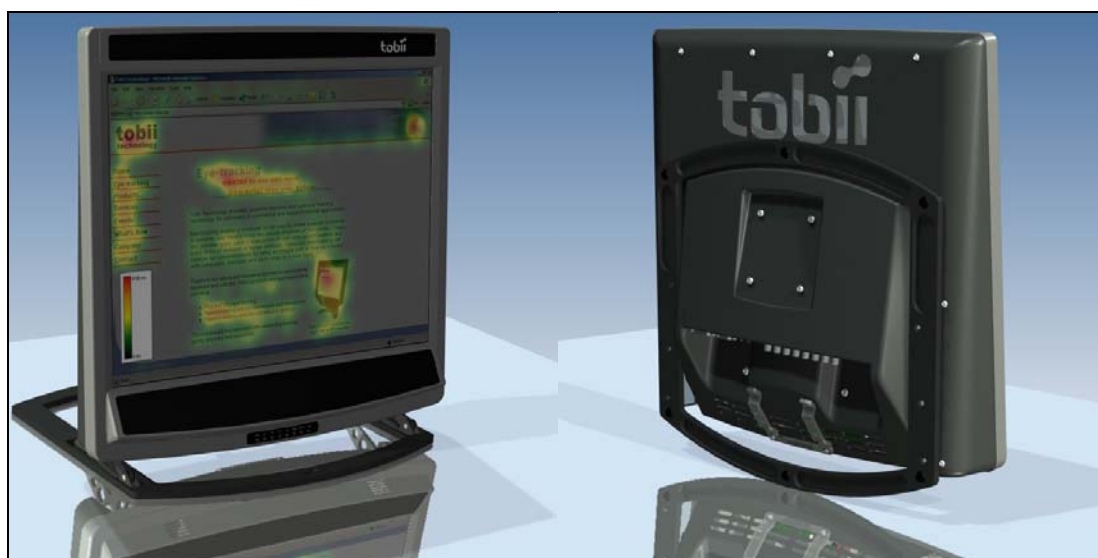
Utveckling av eye-tracker

Design, konstruktion och produktionsanpassning av monitor
i kolfiberkomposit och lättmetall med inbyggd
blickfångningsutrustning
– från idé till produkt

Development of an eye-tracker

Design, construction and preproduction engineering of a
monitor in carbon fibre composite and light metals with
built-in eye-tracking device – *from a concept to a product*

Master Thesis in Lightweight Structures
Department of Aeronautical and Vehicle Engineering
Royal Institute of Technology (KTH)
SE-100 44 Stockholm, Sweden



Lars Viebke
Stockholm
17 April 2008
TRITA-AVE 2008:29



Utveckling av eye-tracker

Design, konstruktion och produktionsanpassning av monitor i
kolfiberkomposit och lättmetall med inbyggd blickfångningsutrustning
– från idé till produkt

Författare:

Lars Viebke viebke@kth.se www.viebke.info.se

Uppdragsgivare:

Tobii Technology www.tobii.com

Handledare:

KTH: **Malin Åkermo**

Tobii Technology: **Bengt Rehnström**

Projektets hemsida:

www.viebke.nu/tobii

Copyright © 2008, Lars Viebke

*Text, fotografier och illustrationer Lars Viebke om inget annat anges.
Spridning, kopiering och eftertryck tillåts om källan och
upphovsmakaren, Lars Viebke, nämns tydligt i direkt samband.
Examensrapporten klassas som offentlig handling.*



Sammanfattning

Detta är en rapport för ett examensarbete på masternivå som genomfördes på Tobii Technology inom området Maskinteknik med inriktning mot Lättkonstruktion. Projektet syftade till att utifrån en existerande eye-tracker (en monitor med inbyggd blickfångningsutrustning) ta fram en helt ny modell avseende alla mekaniska delar med målsättning att uppnå låg vikt, ändamålsenlig attraktiv design, hög flexibilitet och transportbarhet.

Eye-trackern utvecklades från idé till färdig produkt genom följande aktiviteter: industridesign, konstruktion, utvärdering av material, val av produktionsmetoder och lämpliga legotillverkare samt framtagning av prototyper och nollserie hos valda legotillverkare.

Den konstruerade eye-trackern har ett bakstycke i kolfiberkomposit, ett framstycke i fräst aluminium och ett unikt flexibelt fotsystem som tillåter mycket stor vinkeländring och som enkelt fälls in vid transport. Produktionsmetoderna och legotillverkarna för alla eye-trackerns mekaniska delar är valda utifrån den planerade seriestorleken, de uppställda kraven och med syfte att uppnå tillräcklig flexibilitet.

Eye-trackern har låg vikt (halva i förhållande till äldre modellen) en uppdaterad väl mottagen design och har officiellt funnits i Tobii:s sortiment sedan sommaren 2006.

Abstract

This report presents the results of a Master of Science project in Mechanical Engineering and Lightweight Structures performed at Tobii Technology. The aim of the project was to redesign an existing eye-tracker (a monitor with a built-in eye-tracking device) in order to develop an entirely new eye-tracker including all mechanical devices. The final goal was to create a good looking design offering the following features: low weight, high flexibility and good transportability.

The new eye-tracker is developed from initial concept to finished product through the following activities: industrial design, construction, evaluation of materials, selection of production methods and appropriate manufacturers, and production of prototypes and pre-series units.

The developed eye-tracker has a chassis out of pre-impregnated carbon fiber composite and milled aluminium alloy. It has a unique flexible foot with a control system that permits a large range of position angles. Further, the foot is easily foldable making it very portable.

The production methods and the manufacturers were selected on the basis of batch size and their ability to offer sufficient flexibility during manufacturing of the mechanical parts of the eye-tracker.

The developed eye-tracker is significantly lighter (half the weight of the old model). The updated design and technology has received positive feedback from the customers and the product has been sold by Tobii since the summer 2006.



Innehållsförteckning

1	Förord.....	6
2	Ordlista.....	7
3	Bakgrundsbeskrivning.....	15
4	Projekt mål.....	16
5	Kravspecifikation.....	17
5.1	Skallkrav.....	17
5.2	Börkrav.....	18
6	Avgränsningar.....	19
7	Eye-tracking.....	20
7.1	Vad är eye-tracking?.....	20
7.1.1	Ögonstyrning.....	20
7.1.2	Ögonspårning.....	20
7.2	Hur fungerar eye-tracking?.....	21
7.2.1	Skillnad mellan Bright Pupil-belysning och Dark Pupil-Belysning.....	23
7.3	Skillnad mellan en eye-tracker och en monitor.....	24
8	Utvecklingsprocessen.....	26
8.1	Utvecklingsfaser.....	26
8.2	Industridesign.....	27
8.2.1	Funktionell design.....	27
8.2.2	Attraktiv design / rätt utstrålning.....	28
8.2.3	Igenkännande design.....	28
8.2.4	Producerbar design.....	29
8.2.5	Industridesign – från koncept till slutgiltig design.....	30
8.3	Konstruktion.....	36
8.3.1	Konstruktion av fot- och fotmekanik.....	36
8.4	Material och produktionsmetoder.....	43
8.4.1	Material och produktionsmetoder för bakstycket.....	43
8.4.2	Material och produktionsmetoder för framstycket.....	53
8.4.3	Sammansättning mellan fram- och bakstycket.....	60
8.4.4	Material och produktionsmetoder för foten.....	64
8.4.5	Material och produktionsmetoder för kabelavlastaren.....	66
8.5	Dimensionering.....	68
8.5.1	Dimensionering av bakstycket.....	68
8.5.2	Dimensionering av framstycket.....	69
8.6	Prototypframtagning.....	70
8.6.1	Prototypframtagning av bakstycket.....	70
8.6.2	Prototypframtagning av framstycket.....	75
8.6.3	Prototypframtagning av foten.....	77
8.6.4	Prototypframtagning av fotmekaniken.....	78
8.6.5	Prototypframtagning av kabelavlastaren.....	79
9	Slutgiltig konstruktion.....	80
9.1	Slutgiltig konstruktion - ① Bakstycket.....	81
9.1.1	Detaljer för bakstycket.....	81
9.2	Slutgiltig konstruktion - ② Framstycket.....	85
9.2.1	Sammansättning mellan fram- och bakstycket.....	87
9.3	Slutgiltig konstruktion - ③ Fot.....	88
9.4	Slutgiltig konstruktion - ④ Fotmekanik.....	90
9.5	Slutgiltig konstruktion - ⑤ Kabelavlastare.....	93
9.6	Slutgiltig konstruktion - ⑥ Komponentupphängning.....	94



10	Utvärdering.....	96
10.1	Jämförelse mellan skullkrav och resultat	96
10.2	Jämförelse mellan börkrav och resultat.....	100
11	Övergripande resultat	102
12	Referenser.....	103
13	Bilagor	106
13.1	Bilaga 1. Måttitning Tobii 2150C eye-tracker	107
13.2	Bilaga 2. Måttitning för belysare och kamera i Tobii 2150C	108
13.3	Bilaga 3. Vikter för Tobii 2150C delar	109
13.4	Bilaga 4. Involverade legotillverkare	110
13.5	Bilaga 5. Utnyttjade kurser.....	111
13.6	Bilaga 6. IP-klasser för elektriska artiklar.....	112
13.7	Bilaga 7. Screen dump av Tobii:s hemsida	113



1 Förord

Denna examensrapport beskriver ett projekt som genomfördes av Lars Viebke hos Tobii Technology från hösten 2005 till våren 2006. Syftet var att ta fram en ny version av en existerande s.k. eye-tracker, en monitor med inbyggd ögonspårningsutrustning, Tobii 2150. Huvudsyftet från början var att minska vikten och öka transportbarheten, men även göra den mer flexibel och uppdatera designen.

Projektet utvecklades dock till att i princip ta fram en helt ny eye-tracker avseende hela designen och alla mekaniska detaljer, kapsling, komponentupphängning, fot, kabelavlastning och märkning. Några nya komponenter skulle även integreras i den nya eye-trackern. Den nya eye-trackern skulle bli Tobii:s ”flaggskepp”, den dyraste och mest exklusiva eye-trackern anpassad för en kvalitets- och designkänslig marknad och den som i första hand skulle visas upp på mässor.

Namnet på eye-trackern, Tobii 2150, behölls, då det härstammar från skärmstorleken: 21 tum och uppdateringsfrekvensen för ögonspårningen: 50 hertz, dock ibland med tillägget *C* (som i *carbon fibre*) för att markera att delar av den nya eye-tracker var gjorda i kolfiber.

Under samma period som projektet pågick växte Tobii mycket kraftigt i både omsättning, vinst och personal. Därför fanns därför ett stort intresse från Tobii:s sida att undersöka olika produktionsmetoder lämpliga för olika seriestorlekar, framförallt växande, samt bygga upp ett samarbete med nya underleverantörer, tillverkare till de olika delarna i den nya eye-trackern, men även potentiella tillverkare för senare eye-trackers.

En nollserie av Tobii 2150C togs fram under våren 2006 varvid projektet på Tobii avslutades. Den nya eye-trackern har funnits som produkt i Tobii:s sortiment sedan sommaren 2006. Planerad försäljning var vid säljstart 30 till 300 stycken eye-trackers per år. Styckepris ca 250 000 SEK

Rapporten beskriver projektet, men berör endast de delar som ansetts intressanta för läsare, för att förstå bakgrunden samt gången från idé till produkt och vilka avväganden och beslut som har gjorts på vägen, samt alternativa vägar.

Rapporten är skriven på en allmänteknisk nivå för att passa läsare som har genomgått en teknisk utbildning men inte nödvändigtvis inom projektets huvudområde (maskinteknik och lättkonstruktion). De ord som har ansetts som svåra finns samlade i ordlistan i början av rapporten med förklaring, dessa ord generellt *kursiverade* första gången för att markera detta. Även företagsnamn har för tydlighetens skull *kursiverats*.

Rapporten är rikt illustrerad med bilder som kompletterar texten för att öka förståelsen och göra den relativt lättläst. Fotografierna och illustrationerna i rapporten är i största möjliga mån skapade av upphovsmakaren, Lars Viebke. I de fall där det har varit nödvändigt att ta fotografier och illustrationer från externa källor har vikt lagts på att välja information tillåten för spridning. I dessa fall har både copyrightinnehavaren och källan redovisats.

Länk till Power-point-presentationen till projektet samt mer information om Lars Viebke återfinns på hans hemsida:

www.viebke.info.se



2 Ordlista

Ovanliga ord och förkortningar som återfinns i rapporten eller är relaterade till innehållet i rapporten, sorterade i bokstavsordning. Förklaringar beskriver ordets aktuella betydelse (*vissa ord kan ha en annan betydelse i andra sammanhang*).

I de fall där det anses nödvändigt återges även den engelska stavningen inom parantes efter ”eng:”.

1750 – Tobii:s mindre eye-tracker tillika storsäljaren, nomenklatur: 17 = 17 tumskärmstorlek, 50 = 50 hertz uppdateringsfrekvens vid eye-tracking [1]

2150 – den eye-tracker som tagits fram inom projektet, benämns även *2150C* för att skilja från den äldre modellen (*C* kommer från engelskans Carbon fibre = kolfiber), nomenklatur: 21 = 21 tumskärmstorlek, 50 = 50 hertz uppdateringsfrekvens vid eye-tracking [1]

3D-printing – FFF-metod baserad på gips- eller sandpulver bunden med sockerlösning, *se även friformsframställning* [2]

Abrasiv skärning – skärning med slipmedelstillsats, *se vattenskränning* [3]

ABS – termoplast, sampolymer, vanlig vid varmformning [4]

Absorbtionsskikt – skikt vid vakuumbagging, filt eller liknande absorberande material som suger upp överskottshartsen och fungerar som vakuumedare [5]

Amorf – ”glastillstånd” då atomerna i ett material är slumpmässigt placerade och inte har klumpat ihop sig, dvs inte har *kristalinerats*, amorfa plaster är normalt transparenta, exempel på amorfa termoplaster: *PMMA, PC, PS* [6]

AP – Armerad plast (ibland synonymt med Armerad Polyester) [5]

Aramid – fiber för fiberkomposit, linor och skottsäkra applikationer, hög slaghållfasthet, ofta synonymt med varumärkesnamnet *Kevlar* [5]

Armering – förstärkning

Autoklav – trycksatt ugn för bland annat härdning av *pre-preg*-laminat [7]

Avrivningsväv – hartsgenomsläpplig väv som är ytbehandlad för att inte fästa mot härdande laminat, utnyttjas vid *vakuumbagging* för att skilja laminatet från *absorbtionsskiktet* [8]

Blickfångningsutrustning – utrustning som kan mäta var en person tittar för ögonspårning eller ögonstyrning, *se även eye-tracker* [9]

Blästring – efterbearbetningsmetod av metaller baserat på sand eller glasbitar som blåses mot ytan, för att få bort ytdefekter, ge bra fäste för färgning och för att garantera elektrisk kontakt, utnyttjas som efterbearbetningsmetod för 2150C-framstyckena [10]

BP – *se Bright Pupil*

Bright Pupil – den röda-ögon-effekt som uppkommer då ett öga belyses med koaxiellt ljus som reflekteras inne i ögat vilket gör att pupillen lyser upp i förhållande till omgivningen vilket kan utnyttjas vid eye-tracking, fungerar framförallt på små barn, fungerar dåligt för äldre och vissa etniska grupper, för dessa fungerar *Dark Pupil*-teknik bättre [9]

CAD – konstruktion i datormiljö, (eng: *Computer Aided Design*)

CAM – omvandling från *CAD* till *NC-kod*, (eng: *Computer Aided Manufacturing*) [10]

CAM-verktyg – program som automatiskt eller med manuell inblandning omvandlar en *CAD*-modell till *NC-kod* [10]

CNC – innebär att en fleroperationsmaskin elektroniskt styrd följer ett program (*NC-kod*) för att åstadkomma önskad bearbetning eller operation, ofta synonymt med fräsning (eng: *Computer Numeric Controlled*) [10]



- CSM** – korthuggen fibermatta (4-5cm fibrer), vanligtvis E-glas, pulver- eller emulsionsbunden (eng: *Chopped Strand Mat*) [11, 5]
- Cyanoakrylat** – snabblim/superlim, mycket snabbhärdande lättflytande lim, härdar genom att binda naturligt förekommande vattenånga i luft, kan utnyttjas som impregneringsmedel för friformsframställda detaljer via *3D-printing* [2]
- Dark Pupil** – då ögat belyses med ljus som inte är koaxiellt dvs. ljuskällan är inte placerad i närheten av den kamera som tar bilder av ögat så uppfattas pupillen mörkare än den omgivande iris vilket kan utnyttjas vid eye-tracking, fungerar bra på framförallt äldre och vissa etniska grupper, fungerar inte alls på t.ex. små barn, då fungerar *Bright Pupil*-teknik bättre [12, 9]
- Dispensering** – ”spritning” av silikongummiliknande material, för att miljöskydda och/eller ge elektromagnetisk skärmning (se även *EMC-list*) [13]
- Divinycell** – kärnmaterial för sandwichkonstruktioner baserad på *PVC* och *polyuretan* [5]
- DP** – se *Dark Pupil*
- Draperbar** – möjlighet att sträcka en väv över dubbelkrökta former utan att den veckas [5]
- Dural** – höghållfast aluminiumlegering, ofta synonymt med legeringen *EN 2014*
- DVI** – digital anslutningsstandard för monitorer till datorer (eng: *Digital Video Interface*) [14]
- E-glas** – den vanligaste glasfiberkvalitén, elektriskt isolerande [5]
- EMC** – elektromagnetisk kompatibilitet, hur man undviker att en elektrisk apparat stör omgivande apparater med elektromagnetisk störning och hur apparaten skyddas från externa elektromagnetiska störningar (eng: *ElectroMagnetic Compability*) [15]
- EMC-list** – ledande list som har till avsikt att maximera den elektriska kontakten mellan två ytor och därmed säkerställa elektromagnetisk avskärmning (se även *EMC*) [15]
- EMC-tejp** – aluminiumtejp med elektriskt ledande häftämne som används för att säkerställa elektrisk kontakt och elektromagnetisk skärmning (se även *EMC-list*) [15]
- EMI** – funktionsstörning pga. elektromagnetiska störningar (eng: *ElectroMagnetic Interference*) [15]
- E-modul** – elasticitetsmodulen, mått på styvheten för ett material, enheten [N/mm^2] eller [GPa] [16]
- EN 2014** – höghållfast aluminiumlegering, legerad med hög kopparhalt, ej svetsbar, kallas även *dural*-aluminium [17]
- EN 5757** – aluminiumlegering, mjuk lättbockad [17]
- EN 6061** – aluminiumlegering, vanlig i konstruktionssammanhang, härdbar, *strängpressningsbar* till profiler [17]
- EN 6082** – aluminiumlegering, vanlig i konstruktionssammanhang, härdbar, *strängpressningsbar* till profiler [17]
- EN 7075** – höghållfast aluminiumlegering, den starkaste standardlegeringen på marknaden [17]
- EP** – Epoxiplast, se *epoxi* [5]
- Epoxi** - härdplast som bl.a. utnyttjas som lim, skydd, till fiberkompositlaminering, goda mekaniska prestanda [5]
- Epoxy** – se *epoxi* [5]
- EPS** – expanderad polystyren, tex. frigolt
- Evakueringsbehållare** – en vakuumsålig behållare ofta försedd med manometer som utnyttjas vid vakuuminjicering och vakuumbagging på vägen mellan bagen och vakuumpumpen för att skydda pumpen om harts skulle sugas in i vakuumslangen
- Exoterm** – kemisk process som utvecklar värme [5]
- Expanderad metall** – metallnät [18]



- Eye-tracker** – blickmättningsutrustning som kan mäta var en person tittar för ögonspårning eller ögonstyrning [9]
- Eye-tracking** – en teknik som tillåter en dator att veta var en person tittar [9]
- Fabric-over-foam** – ledande list för elektromagnetisk avskärmning (*se även EMC-list*) [15]
- FDM** – FFF-metod baserad på smältning av termoplasttråd, vanligtvis ABS (*eng: Fused Deposition Modeling*) [4]
- FFF** – *se friformsframställning* [4]
- Filmsläppmedel** – *släppmedlen* som bildar en tunn film, vanligtvis vattenlöslig efter att ha torkat, ofta synonymt med polyvinylalkohol [5]
- Firewire** – standard för anslutning av enheter till en dator, Tobii 2150C ansluts via denna kontakt för överföring av bildinformationen från kameran till datorn vilken genomför bildanalysen [15]
- Fler-op** – *se fleroperationsmaskin* [10]
- Fleroperationsmaskin** – elektroniskt styrd bearbetningsmaskin, utför bearbetningar efter program, s.k. *NC-kod*, *se även CNC* [10]
- Flight-case** – specialgjord väska stark nog att klara ovarsam hantering vid t.ex. flygtransport, med hårt skal, metallförstärkta kanter och stötdämpande material inuti, en flight-case med hjul, tillverkad av ProCase togs fram till Tobii 2150C och för att säljas som tillbehör [19]
- Floormate** – extruderad polystyren (*XPS*) för golvisolering, fungerar även bra för formframtagning och som billigt kärnmaterial i sandwichkonstruktioner, skärbart med värmetråd, ljusblå till färgen
- FOF** – *se fabric-over-foam* [15]
- Formsprutning** – den vanligast förekommande produktionsmetoden för framställning av konstruktioner i termoplast vid större seriestorlekar, låg enhetskostnad men hög verktygskostnad [4]
- Formspråk** – begrepp i designsammanhang då man beskriver utformningen av en produkt och dess övergripande formmässiga uttryck [20]
- Friformsframställning** – framställning av detaljer direkt från CAD (*eng: Rapid Prototyping*) [4]
- Galvanisk korrosion** – korrosion som uppkommer då två elektriskt ledande material med olika elektronegativitet (olika ädla) är i kontakt med varandra då det mindre ädla av materialen förbrukas
- Gaze tracking** – den *eye-tracking*-teknologi som Tobii använder sig av där man projicerar ett punktmönster på ögat med belysare och genom att ta bilder av betraktaren och genomföra en bildanalys få reda på var betraktaren tittar [9,12]
- Gela** – när en härdplast går från flytande tillstånd till *geltillstånd* [5]
- Gelcoat** – härdplast specialanpassad som yttersta lager i laminat för bra utseende och skydd, pigmenterad, tixotrop [5]
- Geltillstånd** – det tillstånd för en härdplast då den har härdat så pass att hartsen övergått från flytande till fast tillstånd men fortfarande inte är genomhärdad varvid ytan är klubbig och härdplasten fortfarande kemiskt aktiv [5]
- Gipsgjutning** – gjutmetod främst för aluminium som ger hög ytfinish, låga verktygskostnader men relativt höga styckekostnader, lämplig för små till medelstora serier [21]
- Glasfiber** – fibrer tillverkade av glas, den vanligaste armeringsfibern, hög styrka men begränsad styvhet [5]
- Grafitfiber** – *se kolfiber* [5]
- GRP** – Glasfiberarmerad plast (*eng: Glass fibre Reinforced Plastics*) [5]



- Gänglås** – anaerobt lim som härdar vid blist på syre, utnyttjas för att låsa skruvar så att de inte gängar upp sig vid vibrationer, ofta synonymt med tillverkaren *Loctite*
- Harts** – härdplast i vått tillstånd innan den har härdat
- HDT** – anger den temperatur där plastens fysikaliska egenskaper försämras (*eng: Heat Deflection Temperature*) [22]
- Head movement box** – det område vid eye-tracking inom vilket betraktarens ögon måste befinna sig för att ögonspårningen skall fungera [9,12]
- Honeycomb** – bikakeformat kärnmaterial [5]
- HS** – kolfiberkvalité av standardkvalité men något högre draghållfasthet (*eng: High Strength*) [5]
- Hårdmetall** – volframkarbid, mycket hårt och slittåligt sintrat material, utnyttjas t.ex. till skärmunstycket vid vattenskrining [16, 23]
- Hårdplast** – tvärbunden plast, härdas genom kemisk process, ej möjligt att smälta och forma om, vanligt som matris (bindemedel) för fiberkompositer, *se även polyester, vinylester, epoxi* [5]
- IR** – infrarött ljus, ljus utanför det synliga området, som utnyttjas av eye-trackern för att lysa upp ögat och åstadkomma glimtar vilka utnyttjas för att beräkna hur användaren tittar [9, 12, 15]
- IR-filter** – mörkfärgad plast (*PMMA*) som döljer IR-ljuskällorna på eye-trackern, men som släpper igenom IR-ljuset, dessa är placerade ovan och under skärmen på Tobii 2150C [9, 15]
- Jackofoam** – extruderad polystyren (*XPS*) för golvisolering, fungerar även bra för formframtagning och som billigt kärnmaterial i sandwichkonstruktioner, skärbart med värmetråd, rosa till färgen
- Kevlar** – *se aramid* [5]
- Kimrök** – svart pulver som utnyttjas för att färga plaster svart, utnyttjas även för dess UV-skyddande effekt [24]
- Koaxiell belysning** – belysning som kommer från en ljuskälla placerad runt om eller mycket nära en kamera och som är riktad åt samma håll som kameran, ger röda-ögon-effekt = *bright pupil* för många personer, framförallt unga barn [9, 15]
- Kolfiber** – armeringsfiber som ger mycket styva laminat, utnyttjas även för dess attraktiva utseende och elektriskt ledande förmåga [5]
- Komposit** – två eller flera sammansatta material för att ta fördel av de olika materialens karakteristik [5]
- Koppar-berylliumfingrar** – ledande list för elektromagnetisk avskärmning (*se även EMC-list*) [15]
- Kristalin** – ett tillstånd då atomerna i ett material har klumpat samman sig till kristaller, tex metaller, klistalina termoplaster är ofta *opaka*, (ej transparenta), exempel på kristalina termoplaster: *POM, PA* [6]
- Kromatera** – belägga en metall med ett kromatskikt för att garantera elektriskt ledande förmåga och/eller för att färga ytan [13, 15]
- Kärnmaterial** – sandwichmaterial som separerar de lastbärande yttre skikten i en sandwichkonstruktion, oftast låg densitet, vanligast är cellplaster, balsa och *honeycomb* [5]
- Laminat** – kompositmaterial uppbyggt av flera lager [5]
- Laminera** – bygga upp fiberkomposit genom att väta armeringsfibrer med en matris [5]
- Lamineringsepoxi** – epoxiplast specialanpassad för fiberkompositlaminering, låg *viskositet* [5]
- Lamineringsplast** – *hårdplast* som utnyttjas för laminering av fiberkompositer, vanligtvis *lågvisköst*, vanligast är *polyester, vinylester* och *epoxi*, *se även matris* [5]
- Laserskrining** – bearbetningsmetod, med laser skärs materialet, vanligast förekommande för stålplåt, fungerar inte på kolfiberkompositer då utnyttjas istället *vattenskrining* [25]



LCD – skärmteknik baserad på flytande kristaller som ändrar ljusgenomsläppningen då de beläggs med en spänning

LED – lysdiod, ljuskälla baserad på diodteknik vilken ger hög verkningsgrad och snabb svarstid, utnyttjas som belysare i Tobii:s *eye-trackers* för att lysa upp ögat och åstadkomma glimtar vilka utnyttjas för att beräkna var användaren tittar (eng: *Light Emitter Diode*) [15]

Lexan – varumärkesnamn för *polykarbonat*

Limpulver – pulver för inblandning i *lamineringsplast* för att omvandla den till ett lim, höjer *viskositeten*, ofta baserad på cellulosa [8]

Loctite – se *gänglås*

Macrolon – varumärkesnamn för *polykarbonat*

Matris – bindemedel i fiberkomposit, i fiberkompositer vanligtvis en härdplast (eng: *matrix*) [5]

Mikroballonger – pulver (vitt eller brunt) bestående av mikroskopiska ihåliga glasbubblor, används i lättslipade spackeltyper med låg densitet, utnyttjas även för att blanda i *lamineringsplast* för att få fram ett spackel eller höja *viskositeten* [8]

Monitorarm – arm som utnyttjas för upphängning av monitor eller eye-tracker då större flexibilitet krävs än vad en monitorfot tillåter eller bordsyta inte finns tillgänglig [9]

MyTobii P10 – en eye-tracker med inbyggd dator anpassad till handikappmarknaden, framsidan har en gemensam igenkännande design med den eye-tracker som utvecklats inom projektet, Tobii 2150C [1, 9, 15]

NC – se *CNC* (eng: *Numeric Controlled*)

NC-kod – program för fleroperationsmaskiner (eng: *Numeric Controlled*) [10]

NIR – infrarött ljus nära synliga området, utnyttjas av eye-trackern för att lysa upp ögat och åstadkomma glimtar vilka utnyttjas för att beräkna var användaren tittar (eng: *Near InfraRed light*) [9, 15]

Nollserie – en begränsad tillverkningsserie innan regelrätt serieproduktion har satt igång, utnyttjas för att utvärdera produkten som skall sättas i produktion och produktionsprocessen

Nylon – varumärkesnamn för *polyamid*

Omättad polyester – härdplast vanlig som matris i kompositer armerad med glasfiber [5]

Opak – ej transparent

PA – se *polyamid* [4]

PC – se *polykarbonat* [4]

Peel-ply – se *avrivningsväv* [8]

Pivotled – den led hos en monitorarm vilken medger vinkeländring av den upphängda monitorn [9]

Plexiglas – se *PMMA*

Plugg – positiv form som motsvarar den detalj som skall framställas, utifrån pluggen tar man vanligtvis fram en negativ form (mellanform) i vilken den slutgiltiga detaljen lamineras

PMMA – akrylplast, *amorf* termoplast, transparent varmformningsbar, kallas även *plexiglas* [4]

Polyamid – vanlig termoplast, kristalin, ofta synonymt med varumärkesnamnet *Nylon* [4]

Polyester – plast, både termoplast (mättad polyester) och härdplast (omättad polyester), den mest använda härdplasten vid fiberkompositlaminering [5]

Polykarbonat – termoplast, transparent slagålig, går att kallbocka och varmforma [4]

Polymer – synonymt med plastmaterial, se även *härdplast*, *termoplast* [4]



- Polystyren** – termoplast som bland annat förekommer i expanderat (*EPS*) och extruderat (*XPS*) utförande, cellplaster lämpliga för uppbyggnad av formar och som billigt kärnmaterial i sandwichkonstruktioner
- Polyuretan** – härdplast, förekommer i skummad form som kärnmaterial, för gjutning (*se Ureol*) och som blockmaterial vid fräsning av formar och som matris i komposit [26]
- POM** – acetatplast, *högkristalin* termoplast [4]
- Pre-preg** – armeringsväv förimpregnerad med härdplast som värmehärdas, *från engelskans "pre-impregnated"* [11]
- Pressgjutning** – gjutmetod för bland annat aluminium, ger hög ytfinish och måttnoggrannhet, låg styckekostnad med mycket hög verktygskostnad, lämplig vid stora tillverkningsserier [16]
- Produktifiering** – utvecklingssteget då man vanligtvis går från prototyp till säljbar produkt
- PS** – *se polystyren* [4]
- Pulverlack** – lack baserad på uppladdat polymerbaserat pulver som smälts vid hög temperatur, kostnadseffektiv lackmetod för främst metaller som samtidigt är slittålig [49]
- PUR** – *se Polyuretan* [13]
- RTM** – produktionsmetod för fiberkomposit där torra fibrer placeras i ett hålrum mellan två formhalvor varefter matrismaterialet, vanligtvis epoxi, pressas in i hålrummet och väter fibrerna, hög laminatkvalitet och hög finish men samtidigt hög verktygskostnad, vanligtvis aluminiumverktyg (formar) (*eng: Resin Transfer Moulding*) [11]
- Sandwichkonstruktion** – två tunna men starka täcktskikt separerade med ett lätt kärnmaterial [5]
- Screen dump** – kopia av informationen som visas på skärmen, ett sätt att spara information på exakt som den ser på skärmen t.ex. hemsidor på Internet som riskerar förändras eller plockas bort
- Screentryck** – tryckmetod som bygger på att använda schabloner där de partier som skall tryckas är öppna och resten slutna varvid färgen som stryks över bildar samma mönster som de öppna partierna i schablonen [13]
- Sensor** – benämning på kameran i en eye-tracker [9, 15]
- SLA** – FFF-metod som baseras på att en harts, vanligtvis epoxi, härdas med en laser, stereolitografi [4]
- SLS** – FFF-metod baserad på termoplastpulver som sintras med laser, vanligtvis polyamid (*eng: Selective Laser Sintering*) [4]
- Släppmedel** – medel som appliceras på en form för att laminatet inte skall fästa mot formen då matrisen (härdplasten) har härdat [5]
- Sommarväv** – glest vävd av fisklineliknande plasttrådar, kan användas som transportskikt vid vakuuminjicering
- Strängpressning** – framställning av aluminiumprofiler genom att pressa igenom det uppvärmda materialet genom ett profilverktyg [16]
- Styren** – lösningsmedel som finns i *omättad polyester* och *vinylester*, kraftig lukt, klassas som växthusgas vid avdunstning [5]
- T300** – kolfiber från *Torayca*, vanlig förekommande standard/HS-kvalitet i finishsammanhang [5]
- T6** – härdning/varmålning av aluminiumlegering, läggs till som ändelse på legeringsbetäckningen t.ex. *EN 7075-T6*, ökar hållfastheten avsevärt [6]
- T600** – kolfiber från *Torayca*, vanlig förekommande HS-kvalitet för konstruktionssammanhang [5]
- T700** – kolfiber från *Torayca*, vanlig förekommande HS-kvalitet för konstruktionssammanhang [5]
- Tampontryck** – tryckmetod där man utnyttjar en stämpel, utnyttjas som tryckmetod till Tobii 2150C logotypen på övre IR-filtret och knapptexten, (*jämför med potatistryck*) [13]



Termoformning – se *varmformning*

Termoplast – plast som är omformbar vid värme [6]

TFT – skärmteknik baserade på tunnfilmtransistorer, vanlig i moderna platta bildskärmar, skärmen på Tobii 2150C är av denna typ, *se även LCD* [15]

T_g – glastemperatur, den temperatur när en plast mjuknar [6]

Tixotrop – trögflytande konsistens hos vätska för att undvika att vätskan rinner utan att i större omfattning påverka den vätande förmågan [5]

Tixotroperingspulver – pulver som blandas i harts för att göra den *tixotrop*, vanligtvis kiseloxid [5, 8]

T_m – smälttemperatur [6]

Torayca – marknadens största producent av kolfiber, japansk [5]

Trumling – efterbearbetning av metalldetaljer för att få bort grader och andra ytdefekter, bygger på att detaljen läggs i ett bad med grusliknande material varvid badet skakas, utnyttjas som efterbearbetningsmetod för aluminiumdelarna till fotmekaniken i 2150C [25]

Tryckinjicering – se *RTM* [27]

Twill – vanlig vävtyp, draperbar, benämns efter antalet överlappande trådar i båda riktningarna t.ex. 2x2-twill [5]

Ureol – polyuretan vanligt använd till formar, antingen genom gjutning eller fräsning ur färdiga block

USB – standard för anslutning av enheter till en dator, Tobii 2150C ansluts via denna kontakt för att styra ögonspårningsutrustningen (*eng: Universal Serial Bus*) [14]

Vakuumbagging – Lamineringsteknik där det härdande laminatet täcks med plastfilm varefter luften sugts ut [11]

Vakuumformning – varmformning av termoplastplattor som under vakuum pressas mot en form, *se även varmformning*

Vakuuminjicering – produktionsmetod för fiberkompositer där torra fibrer appliceras och täcks med en vakuumbag varefter luften sugts ur och hartsen tillåts injicera och väta fibrerna (*eng: vacuum injection*) [11]

Varmformning – formning av termoplastplattor som i uppvärmt tillstånd pressas mot en form genom vakuum, övertryck eller en kombination, Vanligaste materialen att varmforma: *ABS, PS, PC, PMMA*

Vattenskäring – bearbetningsmetod, med en tunn vattenstråle under mycket högt tryck kan de flesta typer av material skäras, både med slipmedel (*abrasiv skärning*) och utan slipmedel förekommer, vanligt förekommande bearbetningsmetod för kompositer [3, 23, 28-29]

VESA – standard för upphängning av monitorer (*från eng: Video Electronics Standard Association*) [30]

W_f – viktfraktion fiber, den procentuella fibermängden i en komposit utifrån vikten (*eng: Weight fraction fibre*) [11]

V_f – volymfraktion fiber, den procentuella fibermängden i en komposit utifrån volymen (*eng: Volume fraction fibre*) [11]

VGA – standard för anslutning från datorer till monitorer, analog (*eng: Video Graphics Array*), *se även DVI* [14]

Vinylester – härdplast för bla. fiberkompositlaminering, bra kemikalieresistens, bättre mekanisk prestanda än omättad polyester [5]

Viskositet – mått på hur lättflytande en vätska är, påverkar den vätande förmågan [5]

W_m – viktfraktion matrismaterial, den procentuella mängden matrismaterial i en komposit utifrån vikten (*eng: Weight fraction matrix*) [11]



V_m – volymfraktion matrismaterial, den procentuella mängden matrismaterial i en komposit utifrån volymen (eng: *Volume fraction matrix*) [11]

Värmehärdning – temperaturen höjs kring ett härdande laminat under vanligtvis den senare delen av härdprocessen, ger generellt ett bättre genomhärdat, starkare laminat [5]

XPS – extruderad polystyren, t.ex. *Floormate*, *Jackofoam*, lämplig att utnyttja för att ta fram formar för fiberkompositlaminering

Ytmatta – spindelvävstunn glasfiberväv som utnyttjas ytterst i laminat för att ge en jämn yta och visst mekaniskt och kemiskt skydd, kan även utnyttjas vid formtillverkning i cellplast som genomslipningskydd innan spacklingen [5]



3 Bakgrundsbeskrivning

Följande bakgrundsbeskrivning skrevs innan projektet påbörjades:

Tobii Technology utvecklar och tillverkar produkter för ögonspårning (eye-tracking), med vilken en dator får information om var på skärmen en person tittar. Denna information används inom områden som psykologiforskning, mediautvärdering och handikaphjälpmiddel.

Inom sitt sortiment har Tobii en 17-tums TFT-datorskärm med inbyggd eye-tracking, Tobii 1750, *se figur 1*.



Figur 1: Tobii 1750 eye-tracker, Copyright: Tobii Technology

Tobii har även lanserat en större version med 21-tums TFT-skärm, Tobii 2150, men med begränsad omfattning och under former som är att likna vid prototyp tillverkning. Vid full produktion av 21-tumsversionen är den planerade årsomsättning 30-100 enheter och det beräknade försäljningspriset ca 250 000 kr.

Eye-trackerns bakstycke, framstycke och fot är på prototyperna tillverkad av stålplåt eller aluminiumplåt. Monitorlådan i stål anses vara för tung, medan lådan i aluminium är för vek och buktar samt anses för dyr. Begränsningarna som bockad och svetsad plåt medför innebär även att bakstyckena i metall har en ogynnsam infästningspunkt vilket medför problem att utnyttja en monitorarm för upphängning.

Funktionen hos skärmens fot är inte heller tillfredställande, då denna inte är tillräckligt stabil.

Tobii vill att monitorlådan skall tillverkas i kolfiberkomposit för att främst ge lägre vikt och möjliggöra mer flexibel utformning där fästet placeras närmare tyngdpunkten. Tobii vill även dra nytta av kolfibers attraktiva utseende och kolfibers ledande förmåga för att garantera att elektroniken är avskärmd.

Tobii vill även att en fot utvecklas för att medge bättre stabilitet, bättre justeringsmöjligheter och ett attraktivt utseende.



4 Projekt mål

Följande övergripande projekt mål sattes upp **innan** examensarbetet påbörjades:

”Projektet syftar till att utveckla bakstycke och framstycke i kolfiberkomposit till en eye-tracker, en TFT-datorskärm med inbyggd blickfångningsutrustning. Även en fot till eye-trackern skall utvecklas, men denna kan även tillverkas av metall. Inom projektet skall detaljerna designas och visualiseras med CAD och prototyper.

Tillverkningsmaterial skall väljas och detaljerna dimensioneras. Produktionsmetoder samt lämpliga externa legotillverkare för serietillverkning skall väljas. Inom projektet skall även produktionsformer tas fram på egen hand eller tillsammans med legotillverkare för att kunna producera minst en nollserie.

Projektet skall dokumenteras och redovisas skriftligt i en exjobb rapport enligt KTH:s krav och presenteras muntligt på KTH eller företaget.”

Kommentar till bakgrundsbeskrivningen och projekt målet:

*Bakgrundsbeskrivningen och projekt målet skrevs **innan** examensarbetet påbörjades och utgår från den situation som då gällde. Under projektets gång har förutsättningarna ändrats något, i första hand har Tobii haft en tillväxt långt över vad man kunde föreställa sig, vilket även i viss mån har ändrat kraven och förutsättningarna för exjobbprojektet. Projektet har därmed fått fokus på större serier, men även att väl genomarbete **samtliga** mekaniska detaljer inom eye-trackern, inte bara bakstycket, framstycket och foten, med målsättning att även kunna återanvända detaljlösningar till framtida eye-trackers.*

Kravet på fotkonstruktionen har utökats för att öka eye-trackerns användningsområde och transportbarhet men även för att nisch den aktuella eye-trackern gentemot Tobii:s övriga eye-trackers.



5 Kravspecifikation

Följande kravspecifikation är formulerad och fastställd efter avslutad förstudie, **innan** den praktiska delen av exjobbprojektet påbörjades. Kravspecifikationen har kontrollerats och godkänts av Tobii Technology.

5.1 Skallkrav

*Krav som **skall** uppfyllas gentemot uppdragsgivaren (Tobii Technology). Då krav eventuellt inte kan uppfyllas måste detta godkännas av uppdragsgivaren.*

- Vikten för **bakstycke** och **framstycke** skall understiga **2 kg** (nuvarande delar i stålplåt väger 6,2 kg, i aluminiumplåt 2,1 kg)
- Bakstycket skall **dimensioneras** för att vara minst lika styv som prototypbakstycket i **1,5 mm stålplåt**
- **Produktionsprocessen** för detaljerna skall anpassas för **30 stycken enheter per år** och **10 enheter per beställning**
- Vid val av tillverkningsprocesser skall en **volymökning från 30 enheter per år till 300 enheter per år** beaktas, och hur detta förändrar förutsättningarna, vilken process som då är lämplig skall utredas och dokumenteras
- Elektrisk kontakt mellan fram- och bakstycke skall säkerställas, för att skärmen skall kunna bli **EMC-godkänd**
- Formarna skall utformas så att de **med mindre förändringar kan anpassas** då hårdvarans utseende förändras (t.ex. TFT-modulens mått ändras)
- Kompositdetaljerna skall ha ”**kolfiberutseende**” (dvs. kolfiberväv twill ytterst och optiskt klar plast som matris)
- **Tillverkningskostnaden** för **fram- och bakstycke** tillsammans inkl verktygskostnaden skall understiga **6000 kr/st** vid tillverkning om 30 st (*nuvarande kostnad för delarna i stålplåt: 3000 kr, i aluminiumplåt 6000 kr*)
- **Tillverkningskostnaden** för **monitorfoten** inkl verktygskostnaden skall understiga **2000 kr/st** vid tillverkning om 30 st
- **Fästdon** skall anpassas så att de **tål montering och demontering**, samt **tåla vibrationer** under transport
- Bakstycket skall vara utrustad med **VESA-fäste** med **75x75 millimeters hålmönster** (VESA MIS-D 75), bakstycket skall ha en plan yta om minst 100x100 millimeter kring VESA-fästet
- Bakstyckets **VESA-fäste** skall vara placerat så **nära eye-trackerns tyngdpunkt** som möjligt för att minimera det vridande momentet på monitorarmens pivot-fäste
- Eye-trackerns alla **kontaktdon** skall vara **åtkomliga** på baksidan



- **Kamera och LED:ar** skall placeras med **samma X-ledsmått** och **vinklar** som för den gamla 2150-eye-trackern med plåtchassi. Y-ledsmåtten skall minimeras för att flytta dem **så nära TFT-modulen som möjligt**
- Vinkel mellan **fot** och eye-tracker skall vara **ställbar**
- **Fotens placering** skall vara **mitt under eye-trackerns tyngdpunkt** vid neutralt inställd vinkel och **aldrig hamna i instabilt läge** oavsett vinkelinställning mellan skärm och fot
- **Foten får inte störa åtkomst av kontaktdonen** på baksidan
- Tillräcklig **ventilation** skall finnas för att säkerställa att elektroniken inte blir överhettad
- **Ventillationshålen** skall vara utformade **enligt minst IP 20**, dvs. **hålstorlek max 12 mm** utan strömförande eller heta föremål under hålen
- Tobii Technology's **logotyp** skall **reliefgjutas in i bakstycket** och eventuellt framstycket
- Vid utformning av delarna skall beaktande tas till **transportbarheten** så att **eye-trackern kan packas ner i ett så platt och kompakt paket** som möjligt

5.2 Börkrav

Krav som bör uppfyllas gentemot uppdragsgivaren (Tobii Technology). Eventuella avsteg från börkraven behöver inte godkännas av Tobii men måste kunna motiveras.

- **Maxvikten** för **bakstycke och framstycke** tillsammans bör understiga **1,5 kg** (*nuvarande delar i stålplåt väger 6,2 kg, i aluminiumplåt 2 kg*)
- Maximal **tillverkningskostnad** för **fram- och bakstycke** tillsammans inkl verktygskostnad bör understiga **3000kr/st** vid tillverkning av 30 st (*nuvarande kostnad för delarna i stålplåt: 3000 kr, i aluminiumplåt 6000 kr*)
- **Tillverkningskostnaden** för **monitorfoten** inkl verktygskostnaden bör understiga **1000 kr/st** vid tillverkning om 30 st
- **Vinkel mellan fot och eye-trackern** bör vara ställbara från **horisontellt läge till -20 grader** från vertikallplanet
- **Foten bör vara reglerbar i höjdledd**
- **Ventillationshålen** bör vara utformade enligt minst **IP 30**, dvs. petskyddade med **max hålstorlek 2,5 mm**
- Vid **transport** bör **foten ingå** i paketet tillsammans med eye-trackern **utan att behöva monteras av**
- **Produktionsprocessen** bör väljas så att en **volymökning till 300 enheter per år** är möjlig med begränsade förändringar (t.ex. genom att bara ta fram delar av nya verktyg)



6 Avgränsningar

Innan examensarbetet påbörjades sattes följande avgränsningar upp för att sätta riktlinjer för arbetet och innehållet:

- **Tillgänglig tid:** 800 timmar, varav ca 600 timmar för produktutvecklingsarbete och ca 200 timmar för dokumentation och redovisning.
- **Ekonomiska medel:** Alla utgifter godkänns av Tobii Technology. Företaget kan sätta utgiftstak för projektet.
- **Dimensioneringar:** Endast begränsade beräkningar för dimensioneringen genomförs. Om optimeringen står i konflikt med producerbarheten, väljs bästa möjliga producerbarhet.
- **Verifieringsmätningar:** Endast begränsade verifieringsmätningar genomförs (t.ex. vikt-mätning). Styvhets- och hållfasthetsmätningar behöver inte genomföras utan bara uppskattas.
- **Visualiseringsprototyp:** Endast en (1) prototyp tas fram för att visualisera detaljerna som skall tillverkas. Denna prototyp behöver inte vara tillverkad av samma material, eller med samma dimensionering som de slutgiltiga detaljerna.
- **Formar:** Endast en (1) uppsättning formar tas fram för att kunna producera en nollserie. Eventuella större modifikationer av dessa formar görs utöver projektet.
- **Produktionsmetod:** Valet av produktionsmetod begränsas till vad som anses rimligt med hänseende till den begränsade årsvolymen samt vad lämplig legotillverkare har möjlighet att genomföra.
- **Tillverkning:** All serietillverkning sker utanför projektet hos legotillverkare.



7 Eye-tracking

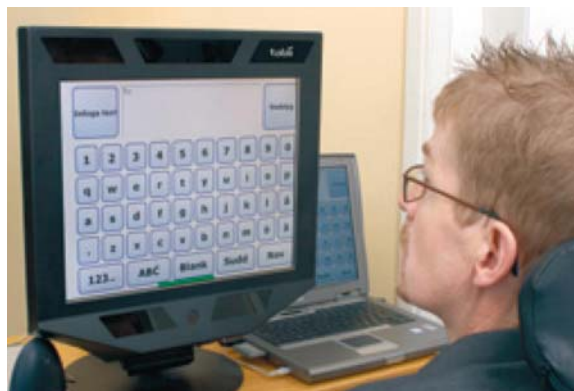
Inom projektet har en eye-tracker (monitor med inbyggd blickformningsutrustning) utvecklats avseende alla mekaniska delar. Projektet har **inte** inkluderat utveckling av blickfångningsutrustningen eller dess komponenter, mer än avseende placering, upphängning och kylning. En förståelse av hur eye-tracking fungerar och vetenskapen om skillnaderna mellan en eye-tracker och monitor utökar dock möjligheterna att sätta sig in i projektet.

7.1 Vad är eye-tracking?

Eye-tracking är en teknik som tillåter en dator att veta var en person tittar. Det finns två olika sätt att utnyttja eye-tracking:

7.1.1 Ögonstyrning

Den metod där blickinformationen utnyttjas direkt för att styra en dator kallas ögonstyrning [9]. Metoden kan utnyttjas för att ersätta en traditionell datormus eller för att komplettera denna. Ögonstyrning utnyttjas idag främst för att tillåta funktionsnedsatta personer som normalt inte kan använda en datormus att kunna kontrollera en dator (*se figur 2*).



Figur 2: Ögonstyrning av dator med hjälp av eye-trackern Tobii 1750 och mjukvaran MyTobii, Copyright: Tobii Technology [11]

7.1.2 Ögonspårning

Den metod där blickinformationen utnyttjas för att spåra eller spela in var en person tittar kallas ögonspårning [9]. Blickinformationen kan utnyttjas för forskning (psykologistudier och beteendestudier, *se figur 3 och 4*), för användarstudier av t.ex. hemsidor på Internet och för att utvärdera reklamannonser.



Figur 3, 4: Exempel på ögonspårning med Tobii 2150C vid Erasmus Behavior Lab, Rotterdam
Vänster: En testperson får titta på en informationssida på eye-trackerns skärm samtidigt som en dator med hjälp av blickfångningsutrustningen i eye-trackern hela tiden spelar in var testpersonen tittar
Höger: Resultatet presenteras på en annan skärm i form av en grafisk information där områden har markerats med olika färg beroende på hur länge testpersonen har tittat på området.
Copyright: Erasmus University Rotterdam. Källa: <http://www.erim.eur.nl>

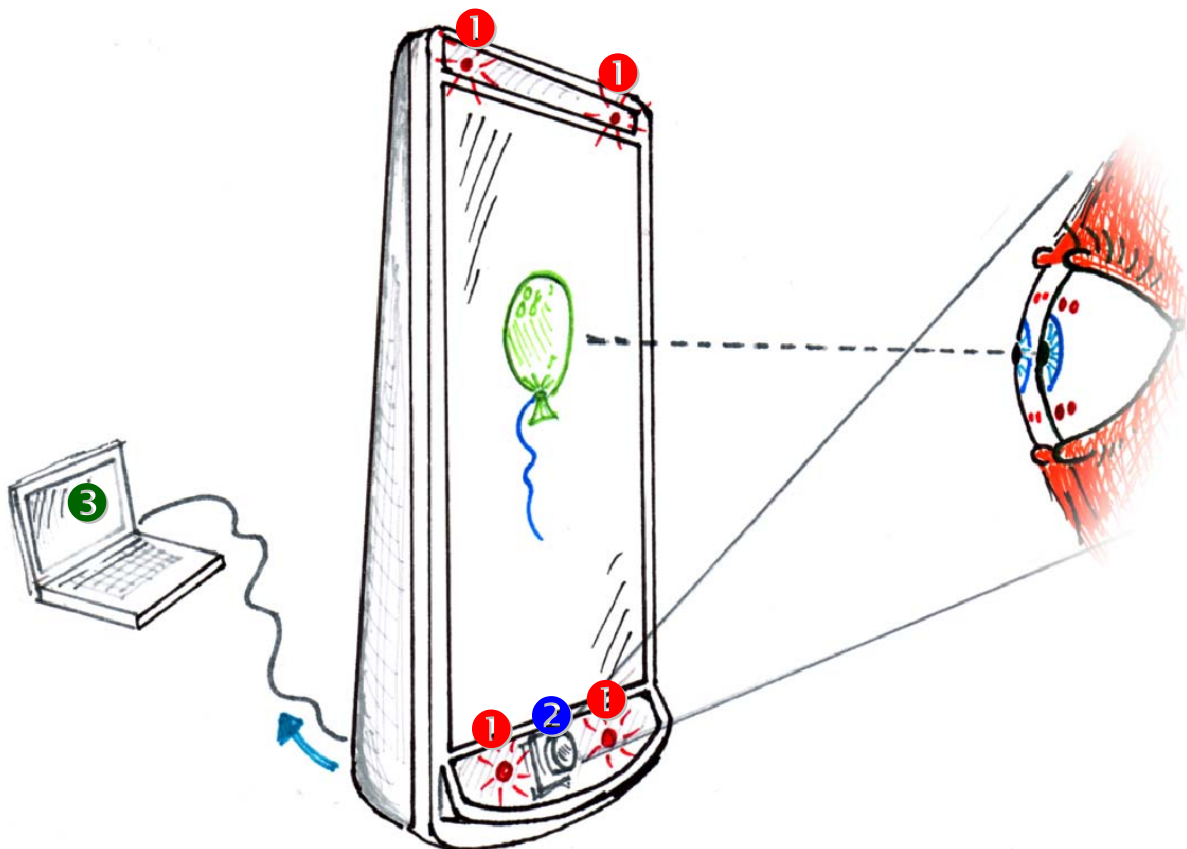


Den eye-tracker som har utvecklats inom exjobbet, Tobii 2150C, är främst framtagen för **ögonspårning**, för annonsutvärdering men även för beteendestudier av små barn [9]. Monitorns relativt stora TFT-element på 21 tum tillåter att visa en annonssida i A3-format i skala 1:1. Storleken gör även att det är lättare att få uppmärksamheten vid studier av små barn i baby-lab.

7.2 Hur fungerar eye-tracking?

Den eye-tracking-metod som Tobii utnyttjar kallas **gaze tracking**, hur denna metod fungerar beskrivs kortfattat nedan, med hänvisning till figuren nedan (se figur 5) [9, 12]:

Ljuskällor (märkta ❶ i figuren) med **IR-ljus** nära det synliga området (**NIR = near infrared light**) belyser den person som skall ögonspåras. Ljuskällornas projektion bildar ett punktmönster på betraktarens ögon. Samtidigt filmar en **kamera** (märkt ❷ i figuren) känslig för IR-ljus betraktaren. Vid en **bildanalys** (märkt ❸ i figuren) i en dator beräknas var personen tittar.



Figur 5: Principskiss över eye-trackerns funktion



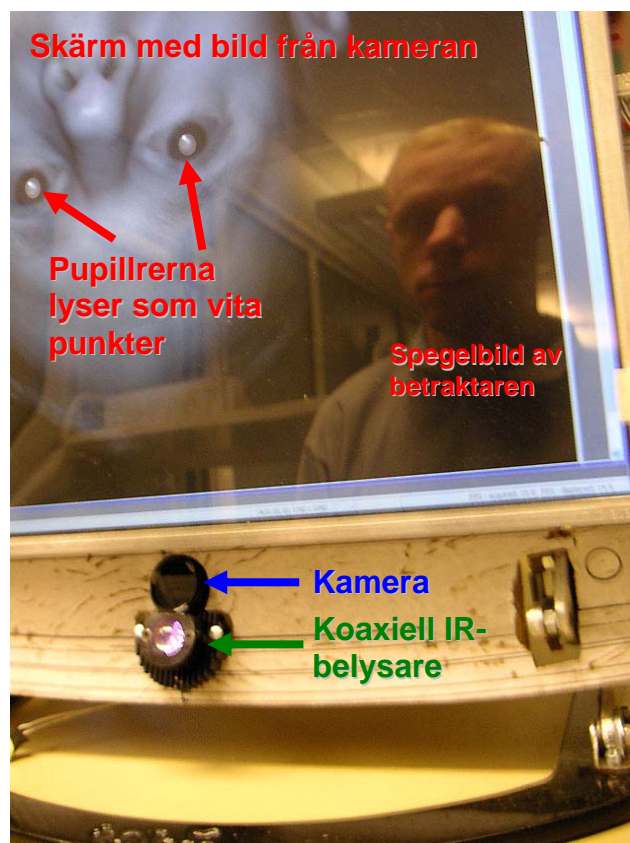
Kortfattat fungerar bildanalysen på följande sätt [12]:

Datorprogrammet letar reda på var ögonen befinner sig i bilderna genom att söka pupillerna som antingen lyser ljusst eller mörkt i förhållande till omgivningen (*Bright Pupil, Dark Pupil*). I närheten av pupillerna syns mönstret som IR-ljuskällorna ger upphov till. Genom att analysera hur mönstret förhåller sig till pupillerna, samt var ögonen befinner sig i rummet framför kameran är det möjligt att beräkna var personen tittar.

Avståndet till ögonen beräknas genom att det projicerade ljusmönstrets storlek analyseras.

Pupillen kan återfinnas i bilden på två sätt, beroende på hur betraktaren belyses och hur betraktarens ögon reagerar på belysningen.

Bright Pupil – BP (på svenska ljus pupill) uppkommer då ögat belyses från samma riktning som kameran, dvs. en *koaxiell belysning* [9, 15]. Pupillen blir då kraftigt ljus eller röd. Detta kan uppkomma då man fotograferar med blyxt och kallas då populärt ”röda ögon-effekt”. Orsaken till att pupillen lyser upp är att ljuset reflekteras inuti ögat och återspeglas genom pupillen. Vid analys av bilder inom NIR-området och vid Bright Pupil-belysning, uppfattas tydligt den ljusa punkten som pupillen bildar i förhållande till omgivningen, *se figur 6*.



Figur 6: Exempel på bright pupil = BP (röda ögon-effekt) vid en testuppställning av en förprototyp till Tobii 2150C, med koaxiell NIR-belysning och upp-och-nervänd svartvit kamera. Observera de vita pupillerna i monitorns bild!

Dark Pupil – DP (på svenska mörk pupill) innebär att pupillen uppfattas som svart [9, 15]. Detta uppkommer om ögat belyses från en avvikande riktning i förhållande till kameran, från sidan, uppifrån eller nerifrån. Vid analys av bilder inom NIR-området Dark Pupil-belysning, uppfattas den mörka punkten som pupillen bildar i förhållande till omgivningen.



7.2.1 Skillnad mellan Bright Pupil-belysning och Dark Pupil-Belysning

Människors pupill reagerar olika på belysning. För vissa uppkommer lätt röda ögon-effekt. Pupillen lyser upp även om belysningen kommer kraftigt från sidan. Detta gäller främst bebisar, se figur 7.



Figur 7: Eye-tracking på baby. Observera den kraftiga röda-ögon-effekten! Trots att denna bild tagen med blixtnett från sidan återspeglas ljuset i pupillerna. (Det återspeglade ljuset från eye-trackern syns inte då det befinner sig utanför det synliga området (NIR))

Foto: Bengt Rehnström. Arrangerad bild.

För vissa personer uppkommer inte röda ögon-effekt. Detta gäller främst vissa äldre och vissa folkslag. Det kan bero på att pupillen är liten, beroende på kraftigt omgivande ljus, ärftliga faktorer eller att personen har utsatts för mycket solljus [9].

För att passa eye-tracking på alla människor har därför den eye-tracker som tagits fram inom exjobbet (Tobii 2150C) både koaxiell belysning för Bright Pupil och sidobelysning för Dark Pupil. Vid bruk avgör mjukvaran vilken belysningstyp som ger bäst bilder för ögonspårning och ändrar automatiskt [12].



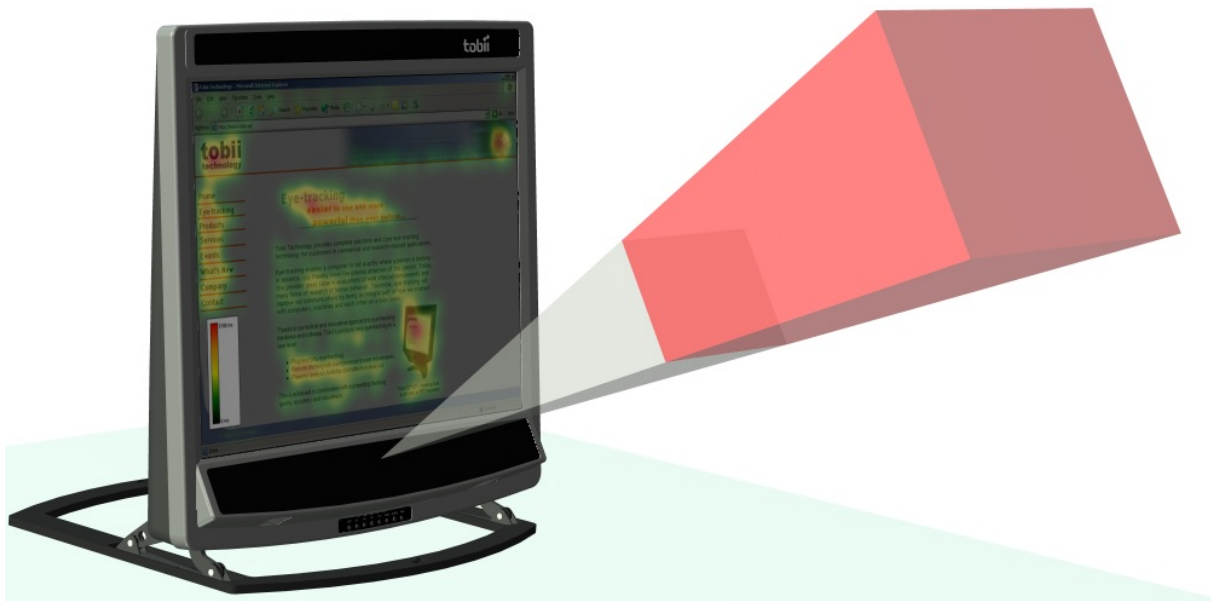
7.3 Skillnad mellan en eye-tracker och en monitor

Det finns olika typer av eye-trackers. Tobii:s specialområde är att utveckla, tillverka och sälja eye-trackers som för brukaren inte skall skilja sig nämnvärt från en vanlig monitor [31]. Blickfångningen fungerar utan att brukaren märker detta eller störs vilket är nödvändigt för de användningsområden där eye-trackers används.

I grunden är en eye-tracker som den som utvecklats inom projektet (Tobii 2150C) en monitor men med extra elektroniska komponenter som tillsammans med en mjukvara i en dator beräknar var brukaren framför eye-trackern tittar på monitorn. Bilden presenteras på ett *TFT-element*, samma som sitter i moderna platta datormonitorer. Ovan och under TFT-elementet är eye-tracking-komponenterna monterade (*se principskissen, figur 5*). Dessa **komponenter kräver exakt måttbeständig montering** för att ge korrekta mätdata [12]. Komponenterna, främst belysarna (*IR-LED*:arna) alstrar värme och måste **kylas** för att inte påverka deras egenskaper och förkorta deras livslängd [15].

För att eye-trackern skall fungera krävs det att betraktarens ögon befinner sig inom ett bestämt område, inom den s.k. "**ögonrörelseboxen**" (*eng: "head movement box"*), *se figur 8* [9, 12]. Boxen bestäms av kamerans fokuseringsområde vilket gör det viktigt att betraktaren befinner sig på rätt plats framför eye-trackern.

Detta gör att det ställs högre krav på att eye-trackern har en enkel och **flexibel fotkonstruktion som framförallt tillåter vinkeländring** för att garantera att betraktarens ögon hamnar inom eye-trackerns ögonrörelsebox.



Figur 8: Med rött åskådliggörs den "box" (*eng: "head movement box"*) inom vilken eye-trackingen fungerar utifrån vad kameran bakom nedre IR-filtret registrerar, inom detta område måste minst ett av betraktarens ögon befinna sig och synas för att personen skall kunna ögonspåras

Eye-trackingkomponenterna, TFT-elementet och monitorerkomponenterna alstrar högfrekvent elektromagnetisk strålning som kan störa annan elektrisk utrustning [15, 32]. För att eliminera läckaget av störningar och för att få eye-trackern **EMC-godkänd**, krävs att eye-trackern kapslas korrekt i ett chassi bestående av ledande material eller material belagda med ledande material alternativt interna skärmande detaljer.



Kravet på skärmning är högre för en eye-tracker än för en vanlig monitor pga. eye-trackingkomponenterna, främst de störningar som bildöverföringen från kameran kan ge upphov till [15, 32].

Eye-trackingkomponenterna ger högre vikt än för motsvarande monitor utan blickfångningsutrustning vilket **kräver att vikten på övriga detaljer, chassi, komponentupphängning och fot minskas** för att kompensera detta, för att inte försämra hanterbarheten och transportbarheten.

Komponenterna tar plats vilket kräver att konstruktionen och **designen måste optimeras** för att dölja komponenterna och för att inte eye-trackern skall bli onödigt stor och klumpig.

Bra transportbarhet är speciellt viktigt då eye-trackers i vissa fall används vid användarstudier på olika platser och då måste transporteras i stor omfattning [31, 33].

Den teknik som Tobii använder sig av är **dyr** och ställer stora krav på eye-trackingkomponenterna för att fungera och ge tillräckligt hög precision. Kunderna är villiga att betala mycket (*försäljningspriset på Tobii 2150C beräknas hamna kring 250 000kr*), men **seriestorlekarna är små** (*beräknad årsvolym för Tobii 2150C var 30-100 stycken när projektet påbörjades*). Eftersom priset är så högt förväntar sig kunderna inte bara en väl fungerande eye-trackingteknik utan även hög mekanisk kvalitet och hög finish.

Den lilla seriestorleken tillsammans med den begränsade priskänsligheten, och de ökade kraven på möjligheten till komponentupphängning, precision och vikt gör **valet av produktionsmetoder och material helt annorlunda** för en eye-tracker i förhållande till en vanlig monitor.



8 Utvecklingsprocessen

Inom exjobbet har hela utvecklingsprocessen för de mekaniska delarna av eye-trackern ingått vilket innebär följande detaljer: kapslingen, upphängning av interna komponenter, fot och fotmekanik, externa reglage, avlastning av kablar, externa optikkomponenter samt märkningsdetaljer.

Utvecklingsprocessen har utgått från en existerande eye-tracker där de flesta elektriska komponenter har bestämts i förväg. Utifrån detta och uppställda premisser har den nya eye-trackern utvecklats hela vägen från idé- och skisstadium till en färdig säljbar produkt. Inom utvecklingsprocessen har det även ingått att finna legotillverkare för många av delarna, och produktifiera eye-trackern tillsammans med dessa tillverkare.

8.1 Utvecklingsfaser

Kortfattat har följande steg ingått i utvecklingsprocessen från idé till slutgiltig eye-tracker:

1. **Förstudie och idéfas** – insamling av data, input från relevanta parter, produktägaren, säljare och utvecklare av de tidigare eye-trackers som känner till kundernas behov. Resultatet av detta kan främst utläsas i kravlistan (se *Kravspecifikationen kapitel 5*).
2. **Skissfas** – skissning av översiktlig design och detaljlösningar.
3. **Designfas** (industridesign) – främst genom att modellera olika lösningar i CAD har eye-trackern och dess delar tillsammans designats på relativt översiktlig nivå.
4. **Konstruktionsfas** – i denna fas har eye-trackern från övergripande till detaljnivå konstruerats. Eye-trackerns delar och funktionen hos dessa samt samspelet mellan delarna har utvecklats. Detta har främst skett genom modellering i CAD.
5. **Prototypfas** – utifrån CAD-modeller framtagna inom konstruktionsfasen har prototyper tagits fram, för att utveckla och utvärdera funktionen hos eye-trackerns detaljer, samspelet mellan eye-trackerns delar samt för att förfina designen.
6. **Produktifieringsfas** – inom denna fas har legotillverkare valts och tillverkningsunderlag tagits fram för dessa. Eye-trackern har gått från prototyp till en produkt, via en nollserie tillverkad hos legotillverkarna.

Trots att utvecklingsprocessen beskrivs kronologiskt, seriellt, har utvecklingen av eye-trackern i praktiken skett mer parallellt. Utvecklingen har därmed ofta skett inom flera stadier samtidigt. I många fall har även utvecklingen hoppat fram och tillbaka mellan stadier. Detta eftersom de olika delarna i eye-trackern är beroende av varandra, men även för att beslut inom en fas kan ha påverkat resultaten från en tidigare fas. Då en del i eye-trackern har ändrats så har andra delar fått anpassats därefter.

I den följande mer detaljerade beskrivningen av utvecklingsarbetet har **inte** ovanstående beskrivna faser följts rakt av. Istället beskrivs enbart de delar inom utvecklingsarbetet som anses mest tongivande för den slutgiltiga lösningen eller som anses extra intressanta. De faser som berörs är designfasen (industridesign), konstruktionsfasen och prototypfasen.



8.2 Industridesign

När man träffar på en produkt är det oftast industridesignen av produkten som styr hur produkten upplevs.

Industridesignen av en produkt syftar till att utforma produkten så att den uppfyller ett antal kriterier. Dessa kriterier kan väga olika tungt beroende på vilken typ av produkt som utformas.

Designkriterier är följande [20, 34]:

- **Funktionell** – produkten skall utformas så att den uppfyller alla funktionella krav och samtidigt är lätt att använda och att produktens och dess funktioner, om möjligt, skall vara självförklarande
- **Attraktiv / rätt utstrålning** – produkten skall se ”snygg” ut men samtidigt inte väcka så mycket uppmärksamhet att produktens utseende stör användaren. Utseendet skall stämma väl med vad man vill att produkten skall utstråla utifrån vad det är för produkt, användningsområden, målgrupp och prissegment.
- **Igenkännande** – om företagets produkter har en viss grafisk profil, och/eller har produkter inom samma familj, skall produkten utformas så att det är lätt att känna igen att produkten tillhör märket och/eller den aktuella produktfamiljen
- **Producerbar** – produkten skall utformas på ett sätt så att den på ett ekonomiskt fördelaktigt sätt kan tillverkas med produktionsmetoder lämpliga för produktens funktion, material och seriestorlek. Utformningen kan även styras om en viss produktionsmetod är vald i förväg utifrån om företaget behärskar denna produktionsmetod eller har väl inarbetade kontakter med legotillverkare som behärskar denna produktionsmetod.

Den totala utformningen är en kompromiss, där de olika kriterierna kan väga olika tungt beroende på vilken typ av produkt som utformas, men även om företaget har en viss designkultur.

Hur kriterierna styrde designprocessen av den eye-tracker som utvecklades under exjobbet, redovisas under följande rubriker:

8.2.1 Funktionell design

Vid industridesignen av Tobii 2150C fanns ett antal uppsatta funktionella krav, framförallt utifrån placeringen av komponenter inom eye-trackern, men även krav på att ta hänsyn till EMC-aspekter, termiska aspekter och praktiska funktioner som fotens justerbarhet, upphängningsmöjligheter, transportbarheten och vikt.



8.2.2 Attraktiv design / rätt utstrålning

Tobii 2150C har vid det främsta användningsområdet – reklamutvärdering och användarstudier två grupper som kommer i kontakt med eye-trackern. För dessa två grupper skall eye-trackern utstråla olika saker:

- **Köpare:** Den grupp som genomför studien och som är beslutsfattare vid inköp av en eye-tracker. För denna grupp skall eye-trackern klart utstråla att det är en eye-tracker, dvs. inte en vanlig monitor utan en ”*monitor som vet var användaren tittar*”. För denna grupp skall det vara klart att det är en tekniskt avancerad, högkvalitativ produkt från det inom eye-tracking välkända företaget Tobii Technology [31].
- **Brukare:** Den grupp som använder eye-trackern, vilket oftast är ”*mannen från gatan*”. För denna grupp skall eye-trackern se ut som vilken monitor som helst och utformningen skall inte ge sken av den teknik som göms bakom. Användaren får inte bli störd vilket kan påverka studien [31, 33]. Användaren får inte heller känna sig övervakad av den inbyggda kameran eller upplyst av de inbyggda IR-lysdioderna.

Detta gjorde att utformningen framifrån var relativt stram, men samtidigt inte allt för tråkig.

Bakifrån skulle Tobii 2150C utstråla ”high-tech” och exklusivitet och samtidigt exponera Tobii:s logotyp kraftigt. Detta eftersom det var troligt att 2150C skulle vara Tobii:s ”flaggskepp” och visas upp på många mässor [31].

8.2.3 Igenkännande design

Tobii hade sedan tidigare en distinkt grafisk profil på sina produkter med stor igenkänningsfaktor. Formspråket skulle kunna kategoriseras som ”*stealth-look*”, med en kantig och samtidigt komplex form med få räta vinklar, se figur 10. Igenkänningsfaktorn framifrån var främst IR-filtrernas ”*elaka-ögon-utseende*”, se figur 9 [20].

Detta formspråk styrdes främst av den aktuella produktionsmetoden – stansning och bockning i plåt och ett försök att uppnå en igenkänningsfaktor [9].

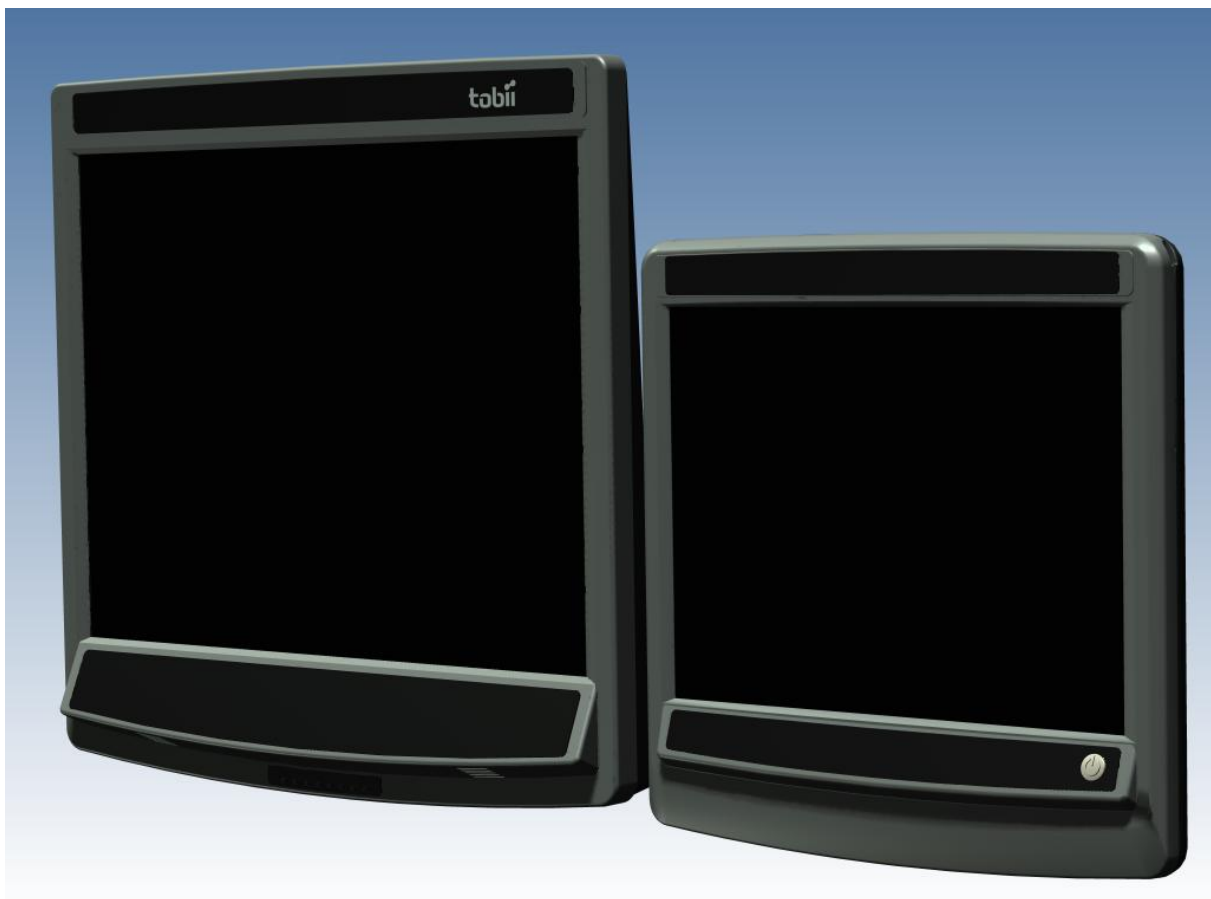


Figur 9, 10: Gamla Tobii 2150 med plåtchassi, Vänster: sedd snett framifrån, Höger: sedd snett bakifrån



I samband med framtagningen av en annan produkt på Tobii – MyTobii P10 – en eye-tracker med inbyggd dator anpassad till handikappmarknaden, valdes att utforma en ny grafisk profil av Tobii:s framtida produkter.

I samband med detta bestämdes att Tobii 2150C framifrån skulle utnyttja igenkännande element som skulle vara gemensamma mellan både *MyTobii P10* och Tobii 2150C, *se figur 11*. Detta för att dessa skulle ”*se ut som en tobii-eye-tracker*”. De igenkännande elementen var främst IR-filterna ovan och under skärmen, med samma bredd som skärmen och inramning av dessa utstickande från den plana framsidan [34].



Figur 11: Igenkännande design mellan två Tobii-eye-trackers. CAD-modellerade bilder av till vänster Tobii 2150C (med 21” TFT) och till höger MyTobii P10 (med 15” TFT), båda utan monitorfötter. De igenkännande elementen är främst de utstickande inramade IR-filterna under och ovan bildskärmen, som båda är lika breda som bildskärmen, radie på ovan och undersidan, kraftigare undertill.

8.2.4 Producerbar design

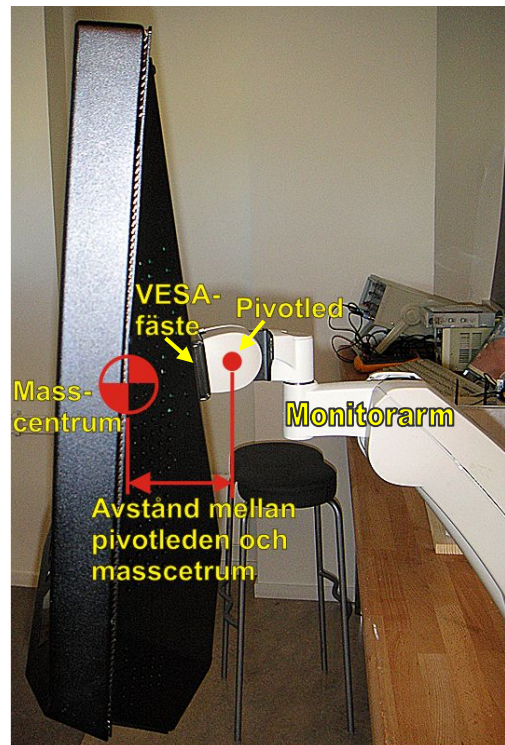
Det fanns ett uttalat krav att materialet i första hand skulle styras för att uppnå minimal vikt till en acceptabel kostnad men även att produktionsmetoden skulle styras efter den relativt låga planerade årsvolymen (30-100 eye-trackers per år). Åtminstone bakstycket skulle tillverkas av kolfiberkomposit vilket även skulle synas.



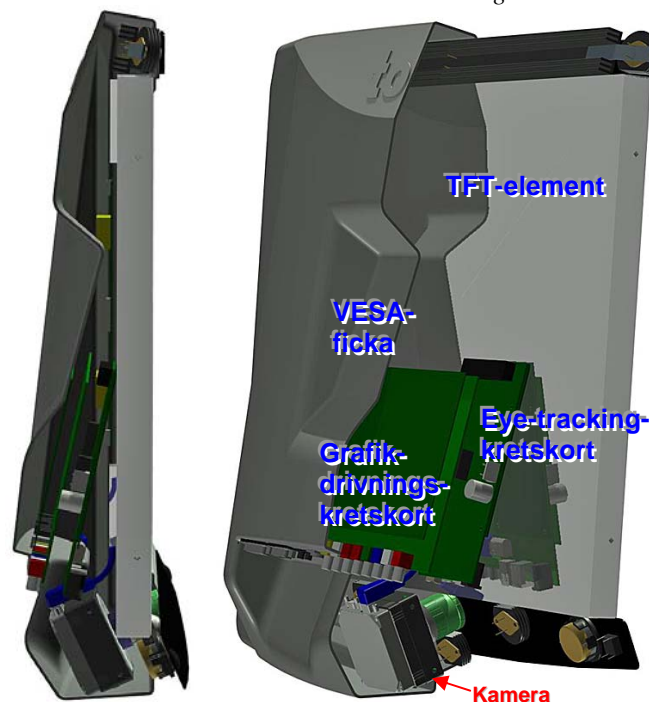
8.2.5 Industridesign – från koncept till slutgiltig design

Innan Tobii 2150C designades fanns en föregångare med plåtchassi *se figur 9 och 10*. Tobii kände till problemen med denna och visste vad de önskade sig ur den nya. Det gällde både funktionella och designmässiga krav.

Ett problem med den gamla Tobii 2150 med plåtchassi, var att avståndet från VESA-fästet till eye-trackerns masscentrum var långt [9], *se figur 12*. Detta tillsammans med den höga vikten gav ett stort moment i monitorarmens *pivotled*. Detta ledde till att Tobii tvingades välja en specialmonitorarm, mycket grov, anpassade för betydligt tyngre monitorer, istället för att kunna välja en enklare, smäckrare, lättare och billigare standardmonitorarm. Ett huvudkrav var därför vid designen av det nya chassiet att flytta VESA-fästet så nära masscentrum som möjligt. Möjligheten för detta bedömdes större för ett kompositbakstycke jämfört med ett plåtbakstycke. Ett kompositbakstycke kan formas mycket mer fritt, följa komponenterna inuti eye-trackern, och man kan skapa en ”grop” i bakstycket, en ficka för VESA-fästet, varvid VESA-fästet flyttas närmare masscentrum, *se figur 13*.



Figur 12: Problem med den gamla Tobii 2150 vid upphängning i monitorarm där VESA-fästet och dess pivotled är långt från masscentrum vilket ger stort moment i leden,



Figur 13: Renderad CAD-bilder med bakstycket i genomskäring, där komponenterna har placerats in. Notera hur bakstycket följer kameran nertill och VESA-fickan som följer kretskortet och TFT-elementet.



Följande kriterier sattes upp vid industridesignen utifrån funktionella och estetiska krav:

Sedd framifrån

- Igenkännande design i förhållande till den mindre MyTobii P10 som utvecklades samtidigt, *se figur 11*. Gemensamma designelement för dessa var främst:
 - IR-filtrerna är lika breda som bildskärmen
 - Inramning av IR-filtrerna
- Utforma bakstycket så att eye-trackern ser smal och smäcker ut när man ser den framifrån eller snett framifrån

Sedd bakifrån

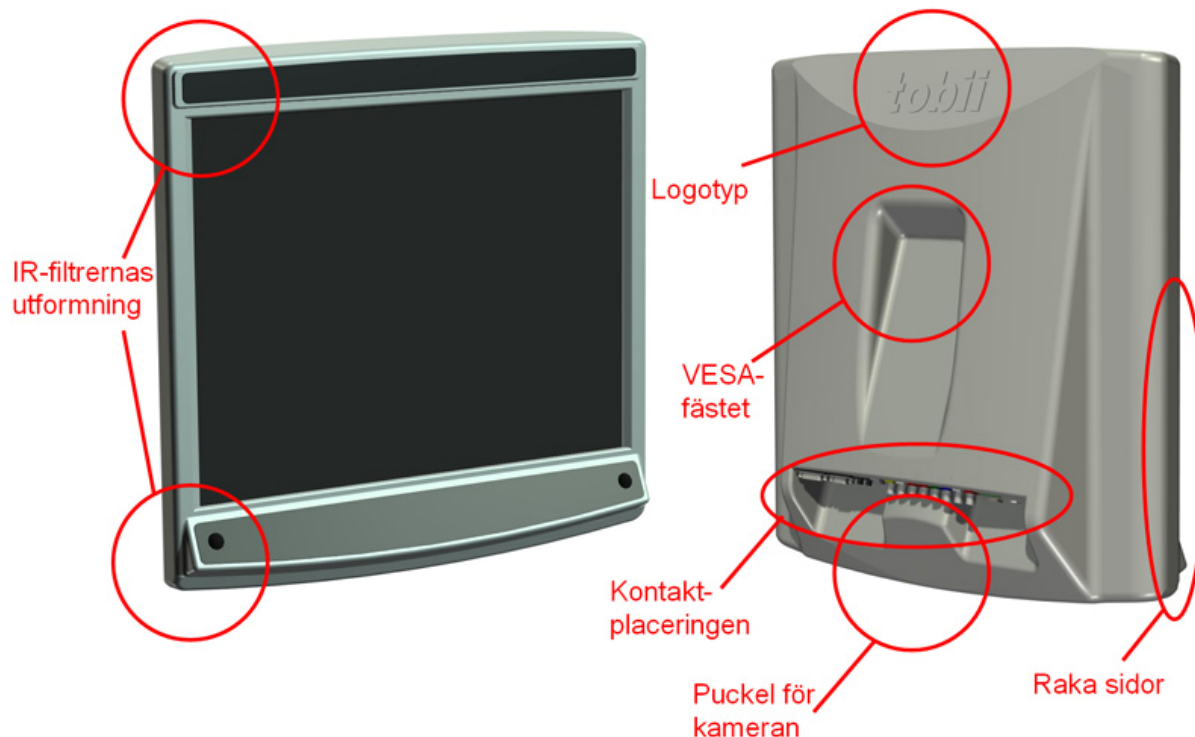
- Försänkt VESA-fäste så nära masscentrum som möjligt
- Stor exponerad logotyp, gärna i kombination med ventilation
- ”Puckel” för kameran för att minimera chassiets volym
- Kontakterna placerade neråt för att underlätta kablarnas gång och störa utseendet minimalt
- Raka vertikala kanter, för att kunna ställa en monitor direkt intill eye-trackern

8.2.5.1 Designkoncept

Utifrån kriterierna togs fyra designkoncept fram där olika detaljer visades. I vissa fall tilläts detaljerna överdrivas för att tydligare påvisa de karakteristiska dragen för koncepten och dess formspråk.

Vid ett designmöte utvärderades designkoncepten tillsammans med delar av hårdvaruutvecklingsavdelningen på Tobii och med en erfaren industridesigner [34]. Detta för att plocka ut olika lämpliga element från koncepten och vidareutveckla dessa mot den slutgiltiga designen.

Gemensamma element för dessa designlösningar presenteras i figur 14.



Figur 14: Bestämda kriterier vid designen av Tobii 2150C, dessa kriterier är gemensamma för alla designförslag



Designkoncept 1 – Kantig

I figur 15 presenteras det första designkonceptet. Detta beskrivs som *kantigt*.
I figuren beskrivs signifikanta detaljer för detta koncept.

Det övergripande formspråket för detta koncept inbegriper följande:

- **Kantiga former**
- **Minimerade mått**



Figur 15: Designkoncept 1, "kantig", med signifikanta detaljer

Designkoncept 2 – Rund

Designkoncept 2, *rund* visas i figur 16, tillsammans med signifikanta detaljer för detta koncept.

Det övergripande formspråket för detta koncept inbegriper följande:

- **Runda former**
- **Maximala radier**
- **Minimerade mått**



Figur 16: Designkoncept 2, "rund", med signifikanta detaljer

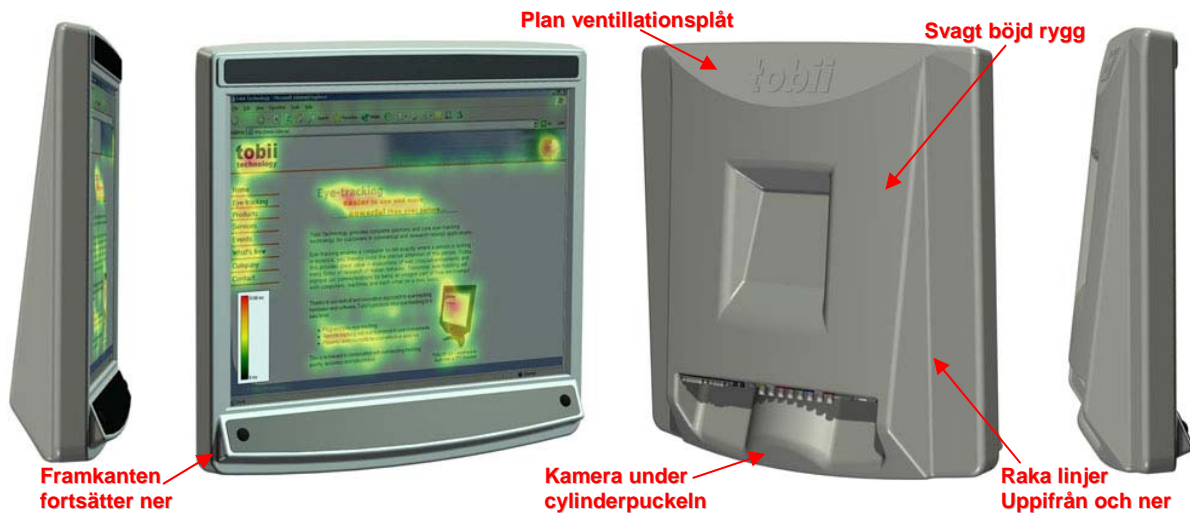


Designkoncept 3.1 – Mellankantig

I figur 17 presenteras det tredje designkonceptet som beskrivs som *mellankantig* samt de signifikanta detaljerna för detta koncept.

Det övergripande formspråket för detta koncept inbegriper följande:

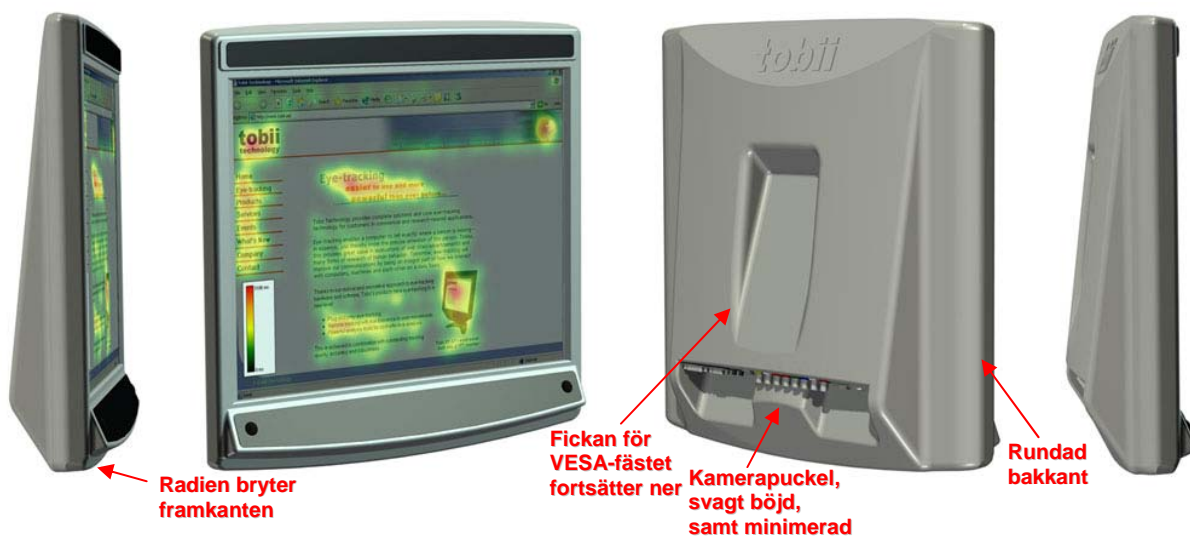
- Små radier
- Strikta linjer



Figur 17: Designkoncept 3.1, "mellankantig", med signifikanta detaljer

Designkoncept 3.2 – Mellankantig

I figur 18 presenteras det fjärde designkonceptet, en variant av koncept 3, med ett gemensamt övergripande formspråk men med vissa annorlunda detaljer som beskrivs i figuren.



Figur 18: Designkoncept 3.2, "mellankantig", med signifikanta detaljer



Vid designmötet med [9, 15, 34] kring designkoncepten beslutades följande:

Framstycket:

Koncept 3.1 (se figur 17) är en bra lösning utan förändringar.

Bakstycket:

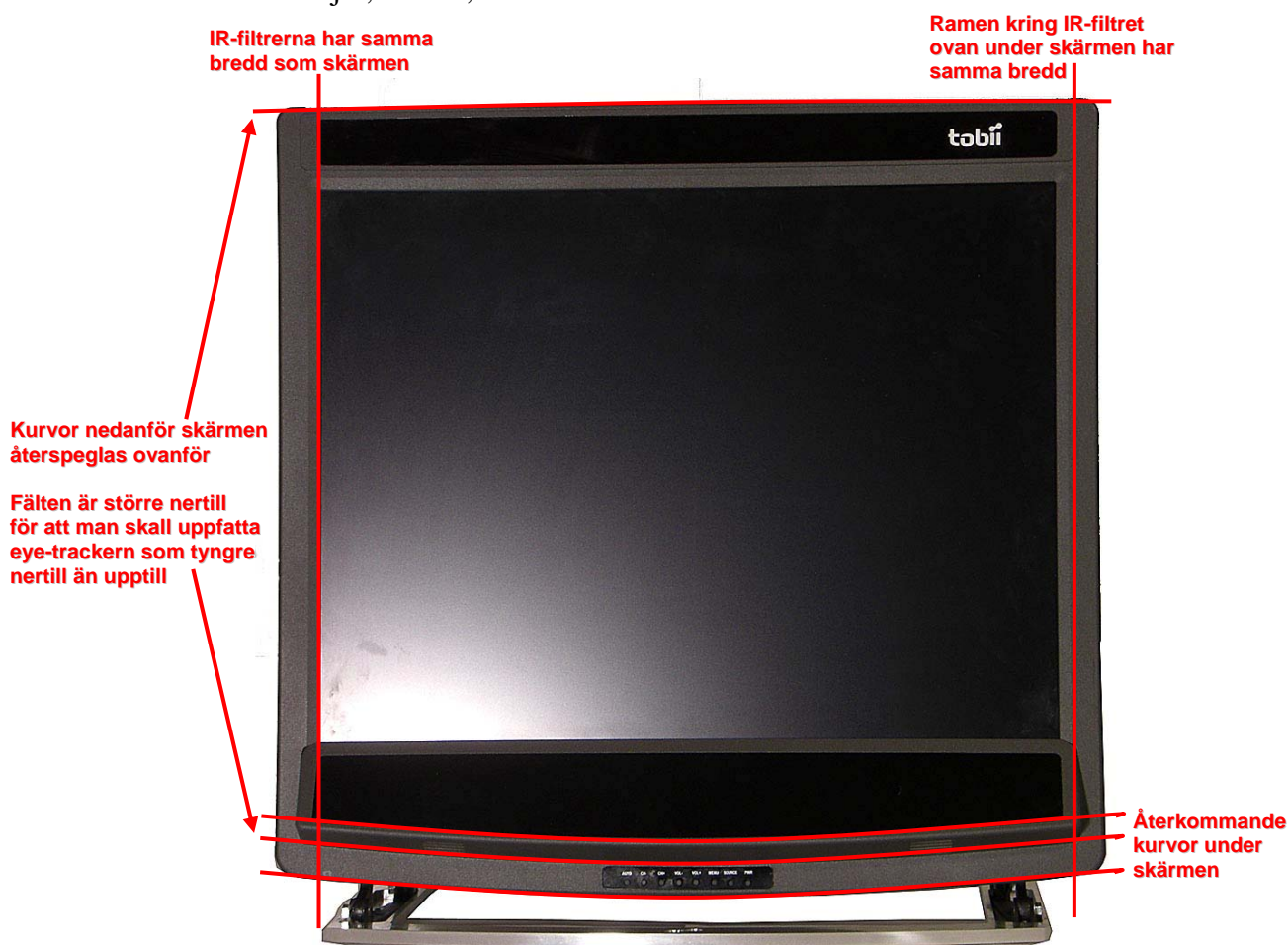
Koncept 3.2 (se figur 18) är en bra lösning men följande förändringar bör göras inför den slutgiltiga designen:

- VESA-fickan skall vara lika bred som ”kamerapuckeln” för att ge balans i linjerna
- De vertikala linjer som bildas av utstickande delen från bakstycket skall vara parallella, detta åstadkoms genom att ytan ”vrids” och lutningen är flackare upptill än nertill
- Nederkanten på VESA-fickan bör vara synlig för att markera fickan och dess funktion

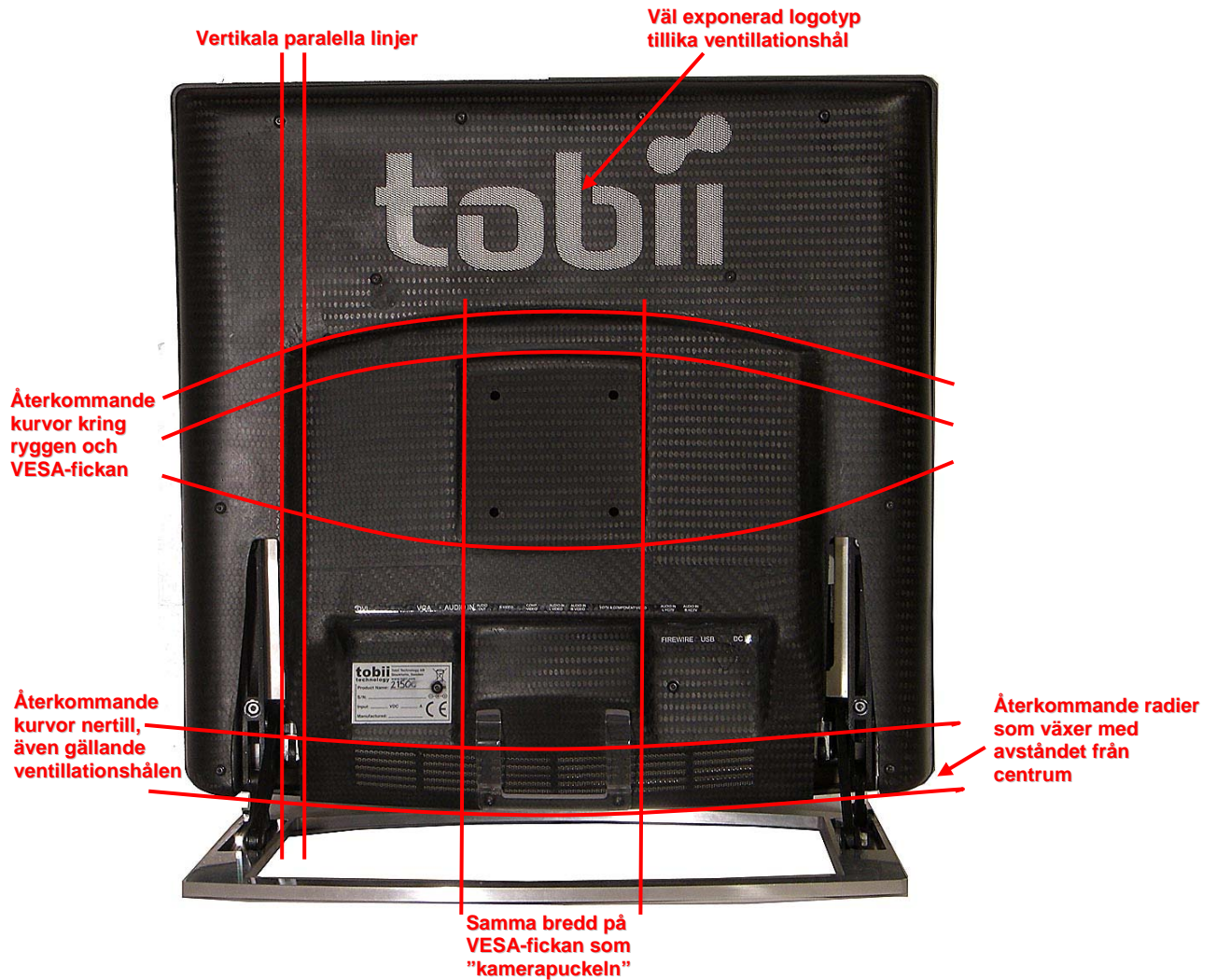
8.2.5.2 Slutgiltig industridesign

Vid utformning av en produkt som upplevs som ”attraktiv” gäller det att finna en balans mellan linjer, kurvor, radier och fält hos produkten. Detta åstadkoms genom att styra linjer, kurvor och radier så att de återkommer [20]. Återkommande fält hos produkten balanseras så att produkten inte känns övertung åt något håll, eller om det är önskvärt övertung neråt.

I figurerna 19 och 20 visas den slutgiltiga designen av eye-trackern framifrån och bakifrån. Återkommande linjer, kurvor, radier och fält har markerats.



Figur 19: Slutgiltig design, Tobii 2150C (nollserieexemplar) sedd framifrån, där gemensamma linjer, kurvor och fält har markerats



Figur 20: Slutgiltig design, Tobii 2150C (nollserieexemplar) sedd bakifrån, där gemensamma linjer, kurvor och radier har markerats



8.3 Konstruktion

Vid designfasen utvecklades i CAD-miljö den övergripande formen för chassiet till eye-trackern. Vid den följande konstruktionsfasen togs steget vidare mot en riktig konstruktion. Eye-trackerns delar, deras funktion och samverkan mellan delarna utvecklades från övergripande nivå till detaljnivå med 3D-CAD (programmet *IronCAD*) som främsta verktyg.

I rapporten beskrivs under detta kapitel endast konstruktionsarbetet för eye-trackerns fot- och fotmekanik, utgående från en kravspecifikation och existerande monitorfötter på marknaden.

Materialval och val av produktionsmetoder för eye-trackerns olika delar skedde även dessa under konstruktionsfasen, detta beskrivs dock i nästa kapitel (*se kapitel 8.4*).

8.3.1 Konstruktion av fot- och fotmekanik

En vital del för en eye-trackers funktion är möjligheten att ställa denna framför användaren och rikta den korrekt mot användaren. Normalt ställs eye-trackern på ett bord, för detta krävs en fot som eye-trackern vilar på och som ger möjlighet att justera eye-trackern till önskad position.

Följande egenskaper var önskvärda för eye-trackerns fot- och fotmekanik:

- **Stor flexibilitet**, lutning från -5 grader (från vertikalt läge, dvs. något framåtlutande) till nästan horisontellt läge, detta för att både fungera i vanligt monitorläge och för att möjliggöra tidningsläsande på skärmen vid annonsutvärdering
- **Inget instabilt läge** oavsett inställd lutning
- Möjlighet att **fälla in** eller **lätt ta bort foten** och sätta i eye-trackerns i dess *flight-case* [19] (väska) vid transport
- **Lägsta möjliga vikt** utan att äventyra stabiliteten
- **Enhetligt utseende** tillsammans med den övriga eye-trackern
- **Låg höjd från underlaget till skärmytans underkant oavsett lutning**, eftersom skärmytan är så stor och eye-trackingkomponenterna under skärmen annars gör att skärmytan kommer för högt upp i förhållande till användaren
- **Hög kvalitetskänsla**, bör kännas styv, inget gnissel
- **Enkel att använda**, helst inga inställningsskruvar eller liknade
- Foten får **inte sitta i vägen för utgående kontakter** och kablar

Inför konstruktionen av fot- och fotmekanik till eye-trackern gjordes en genomgång av förekommande monitorfötter på marknaden, *se figur 21 - 30*. Både de som inkluderas i monitorer och de som kan köpas separat. Fötterna analyserades utifrån deras funktion, design och hur väl lämpade de kunde vara att utnyttja på eye-trackern för att uppnå ovanstående önskade egenskaper.



I figur 22-30 visas exempel på förekommande monitorfötter på marknaden, dessa har sorterats in utifrån deras placering och funktion:

Monitorfötter fästa i nederkanten med låg flexibilitet:



Figur 21, 22: Exempel på monitorfötter som fäster mot nederkanten, den större är en Tobii 1750 eye-tracker, den mindre en ViewSonic 17-tumsmonitor. Monitorfötterna medger ingen höjdregering och har en starkt begränsad möjlighet att ändra lutningen

Fot fäst i nederkanten som kan fällas in:



Figur 23, 24: Exempel på monitor (Samsung Syncmaster 710 mp) med fot fäst i nederkanten som kan fällas in (på bilderna är den upphängd i VESA-fästet), foten går endast användas i lutningar nära vertikalt läge



Monitorfötter med höjdreglering fästa i VESA-fästet:



*Figur 25, 26: Exempel på monitorfötter med höjdreglering fästa i VESA-fästet, avbelastade med fjäder
Vänster: DELL, Höger: Kodak*

Flexibla fötter, fästa i VESA-fästet:



Figur 27, 28, 29: Exempel på flexibla monitorfötter: Vänster och mitten: HP, Höger: Okänt märke

Enkel fot, fäst i masscentrum:

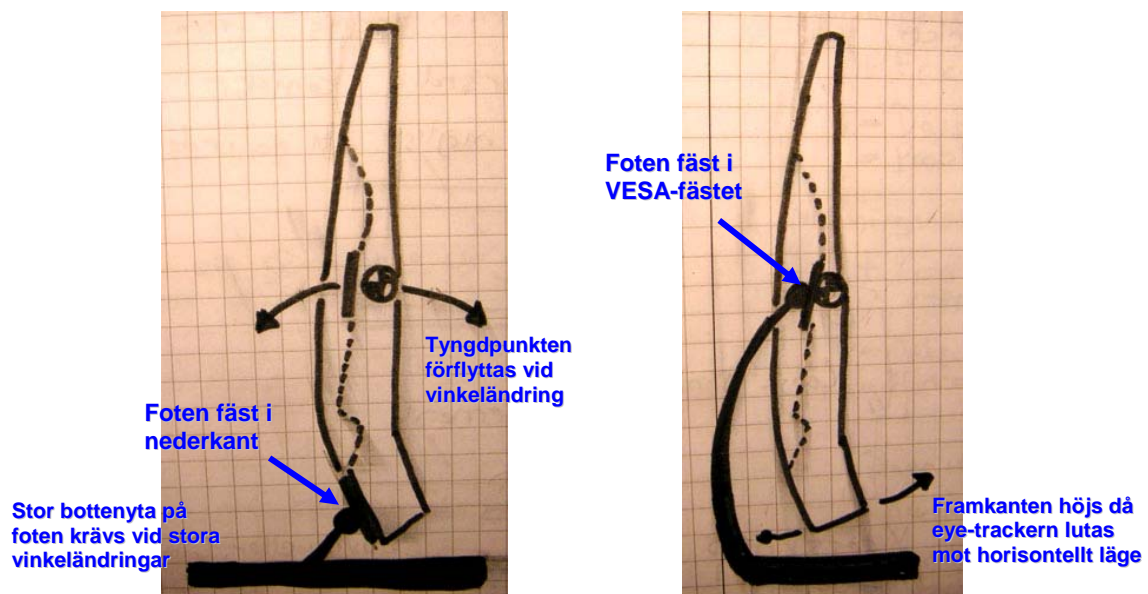


Figur 30: Monitorfot på en Macintosh med ren design, böjd aluminiumprofil infäst i tyngdpunktcentrum, dock ej i VESA-fästet (som saknas på denna skärm/dator)



*Det förekommer två huvudgrupper av monitorfötter som passar till eye-trackern.
 Deras för- och nackdelar beskrivs i tabellen nedan:*

Monitorfot, huvudtyp	Fördelar	Nackdelar
Fäst i nederkant (se figur 31 och 21-24)	<ul style="list-style-type: none"> + Kan lämnas kvar då VESA-fästet används + Möjlig att göra kompakt och lätt + Möjligt att integrera i designen + Avståndet mellan eye-trackerns nederkant och bordet är någorlunda konstant även när eye-trackern lutar mot horisontellt läge + Foten sitter inte i vägen för kontakterna 	<ul style="list-style-type: none"> - Stor vinkeländring kräver motbelastande fjädersystem och stor bottenyta på foten - Höjdregering är inte möjlig eller kraftigt begränsad
Fäst i VESA-fästet (se figur 32 och 25-29)	<ul style="list-style-type: none"> + Medger stor vinkeländring utan motbelastande fjädersystem + Endast liten bottenyta krävs för foten även vid stor vinkeländring + Det finns plats för teleskophöjdregering i foten + VESA-standarden är ett standardiserat system 	<ul style="list-style-type: none"> - Måste monteras bort om eye-trackern skall hängas upp med monitorarm i VESA-fästet - Då eye-trackern lutar mot horisontellt läge höjs nederkanten i förhållande till bordsytan, om inte foten samtidigt sänks - Riskerar sitta i vägen för kontakterna



Figur 31, 32: Principskisser över de två huvudgrupperna av monitorfötter

Marknadsgenomgången visade att det inte fanns någon färdig lösning som uppfyllde kraven. Inte heller gick det finna någon lösning som kunde ”kopieras” rakt av. Därför var det nödvändigt att konstruera en helt ny lösning, en fot och fotmekanik som inte används på någon av marknadens monitorer eller eye-trackers.



Eye-trackerns fot- och fotmekanik konstruerades genom iteration i CAD-miljö (se figur 33-35), modeller i kartong och kretskortsmaterial, prototyper i metall och plast i ett antal steg innan slutgiltig lösning hade nåtts. I figurerna 36-45 och 117-119 visas vissa av prototyperna.



Figur 33-35: Exempel på CAD-modeller under utvecklingsarbetet med fot- och fotmekanik

Presentation av vald lösning:

Lösning:

En variant på monitorfot fäst i nederkanten men med fotmekaniken inbyggd i chassiet. Kraftig variation av lutningen tillåts, motbelastande system med gasfjädrar och fot med stor bottenyta. Foten kan fällas in vid transport eller då eye-trackern hängs upp i VESA-fästet med en monitorarm.

Viktigaste orsakerna:

- Möjlighet att använda VESA-fästet utan att behöva ta bort foten.
- Möjlighet att inkludera foten i konstruktionen, både funktions- och designmässigt. Foten tar minimal plats och inkluderas i designen då den fälls in.
- Höjdregering ansågs vara onödig eftersom skärmen är så stor och ögonspårningsutrustningen under skärmen tar plats, vilket gör eye-trackern tillräckligt hög placerad vid användning på skrivbord och ytterligare höjning enbart försämrar ergonomin.
- Ingen risk för att foten sitter i vägen för kontakterna.

Eftergifter:

- Ett relativt komplext motbelastat system med gasfjädrar krävs för att tillåta stor vinkeländring.
- Stor bottenyta på foten krävs för att eye-trackern skall vara stabil även då den är ställd i nästan horisontellt läge, foten tar mycket plats bakåt då eye-trackern är ställd i vertikalt läge.



Lösning:

Foten går att justera från nästan horisontellt läge vertikalt läge.

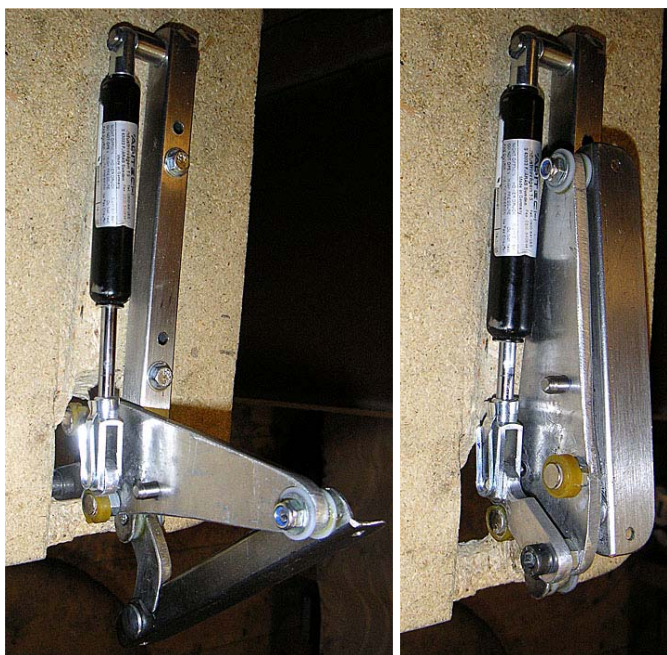


Figur 36-39: Demonstration av olika lutningsinställningar för eye-trackern på en prototyp där eye-trackern har ersatts med en spånplatta och en vikt. Från vertikalt, något framåtlutande läge längst till vänster, till nästan horisontellt läge längst till höger

Mekaniken till foten består på varje sida av två länkar, en länkkoppling ("snäppled") och en gasfjäder. Mekaniken som ryms i fickor i eye-trackerns rygg och göms vid infällt läge. Gasfjädrarna balanserar eye-trackerns vikt oavsett vald lutning. Mekaniken är anpassad till en fjäderkraft på 200-300 Newton.

Då eye-trackern transporteras eller hängs upp i VESA-fästet trycks foten mot ryggen varvid fotmekaniken med ett klick byter läge och istället för att fjädra ut fjädrar in.

Då foten skall användas dras fotbågen ut från ryggen och återgår till utfjädrande läge med ett klick (se figur 40 till 45).



Figur 40, 41: Demonstration av fotmekaniken på en prototyp.
Vänster: foten i utfällt läge
Höger: Foten i infällt läge



Figur 42-45: Demonstration av fotmekanikens två lägen på en prototyp där länkkopplingen till gasfjädern ("snäppleden") är inringad och förstord.

Vänster: Utfällt läge, gasfjädern trycker ut foten för att balansera eye-trackerns vikt oavsett lutning

Höger: Infällt läge, gasfjädern strävar efter hålla tillbaka foten mot ryggen.

Mellan dessa lägen inträder ett instabilt läge där länkkopplingen som gasfjädern är kopplad mot ("snäppleden") byter läge.

I uppfällt läge fälls fotbågen mot ryggen och nederdelen fungerar som handtag varvid eye-trackern kan bäras upp-och-ner (se figur 147 och 150).

I framkanten av fotbågen finns det plats för Tobii:s logotyp varvid logotypen exponeras både då foten används och eye-trackern hänger i VESA-fästet (se figur 139).



8.4 Material och produktionsmetoder

Val av material- och produktionsmetoder ingick inom konstruktionsfasen. Detta skedde genom att utgå från eye-trackern och dess delar, deras utseende och funktionskrav samt den planerade tillverkningsvolymen.

I rapporten beskrivs valet av material och produktionsmetoder endast för ett urval av eye-trackerns delar, framförallt de stora och de med speciella funktionskrav.

Följande delar beskrivs, siffrorna refererar till figuren till höger (se figur 46):

- ❶ Bakstycke
- ❷ Framstycke
- ❸ Fot
- ❹ Kabelavlastare



Figur 46: Cad-modell av Tobii 2150C sedd snett bakifrån

8.4.1 Material och produktionsmetoder för bakstycket

Vid början av projektet bestämdes det att bakstycket till eye-trackern av olika orsaker skulle tillverkas av kolfiberkomposit. De produktionsmetoder som anses mest lämpliga vid den aktuella formen, storleken och planerade tillverkningsvolymen har därför utvärderats.

Fyra produktionsmetoder för att framställa bakstycke till eye-tracker i kolfiberkomposit har utvärderats:

- Våt laminering med vakuumbag
- Vakuuminjicering
- Pre-preg med autoklavhärdning
- RTM

För varje produktionsmetod har ett representativt företag i Sverige valts. Dessa har fått uppskatta tillverkningskostnaden och verktygskostnaden, vid tillverkning av bakstycket med respektive produktionsmetod (se tabell 1).



8.4.1.1 Våtlaminering med vakuumbag

Den enklaste produktionsmetoden som utvärderats är våtlaminering med vakuumbag. Denna produktionsmetod sker nästan uteslutande manuellt, ställer låga krav på verktyg och är mycket flexibel [11]. Därför är metoden främst lämpad för tillverkning av enstaka exemplar till små serier. Eftersom metoden är arbetskrävande och ställer relativt höga krav på den som utför processen är styckkostnaden normalt hög.

Produktionsmetoden är lämpad för allt från små konstruktioner till mycket stora, alla armeringsfibrer förekommer (*glasfiber, kolfiber* och *aramid*), liksom alla vanligt förekommande matrismaterial (*polyester, vinylester* och *epoxi*) [11].

Med hjälp av nedanstående figurer (*se figur 47-56*) och tillhörande förklaringar beskrivs hur en våtlaminering av ett kolfiberlaminat med härdning under en vakuumbag går till steg för steg. *Observera att det inte är bakstycket som lamineras men en konstruktion med liknande format och utseende.*

1. Formen förbereds genom att beläggas med vax och *släppmedel*, eventuell tätningsslist för vakuumbagen (t.ex. flytande butylgummi) placeras utmed formens kanter.



Figur 47, 48: Laminering med vakuumbag, steg 1

2. Formen beläggs med *armeringsfiber*, i detta fall kolfiber.
3. Armeringsfibern väts med *harts* (*matrisplast*), i detta fall epoxi.



Figur 49, 50: Laminering med vakuumbag, steg 2 och 3



4. Laminatet täcks med *avrivningsväv* (*peel-ply*) eller perforerad plast, ett skikt som separerar laminatet från det nästföljande *absorbtionsskiktet* och som tillåter överskottsharts att flyta igenom till absorbtionsskiktet.
5. Ett lager absorbtionsskikt (t.ex. filt) läggs på, detta skikt fungerar även som vakuumbledare.



Figur 51, 52: Laminering med vakuumbag, steg 4 och 5

6. Laminatet täcks med en vakuumbag som tätas med t.ex. flytande butylgummi.
7. Med hjälp av en kompressor sugs luften i vakuumbagen ut varvid absorbtionsskiktet pressas mot avrivningsväven vilken i sin tur pressar laminatet mot formen. Överskottsplasten i laminatet pressas genom avrivningsväven och suggs upp av absorbtionsväven. Laminatet tillåts härda, vid rumstemperatur eller förhöjd temperatur.



Figur 53, 54: Laminering med vakuumbag, steg 6 och 7

8. Vakuumet i bagen släpps och bagen avlägsnas. Den härdade detaljen separeras från formen. Avrivningsväven och absorbtionsskiktet rivs bort från insidan av detaljen och kasseras.
9. Därefter följer vanligtvis efterbearbetning av konstruktionen där överskottskanten på detaljen avlägsnas, samt eventuell ytterligare bearbetning (slipning, borrar, vattenskärning, lackering etc.). (I figuren har skyddspapp satts på konstruktionen under efterbearbetningen)



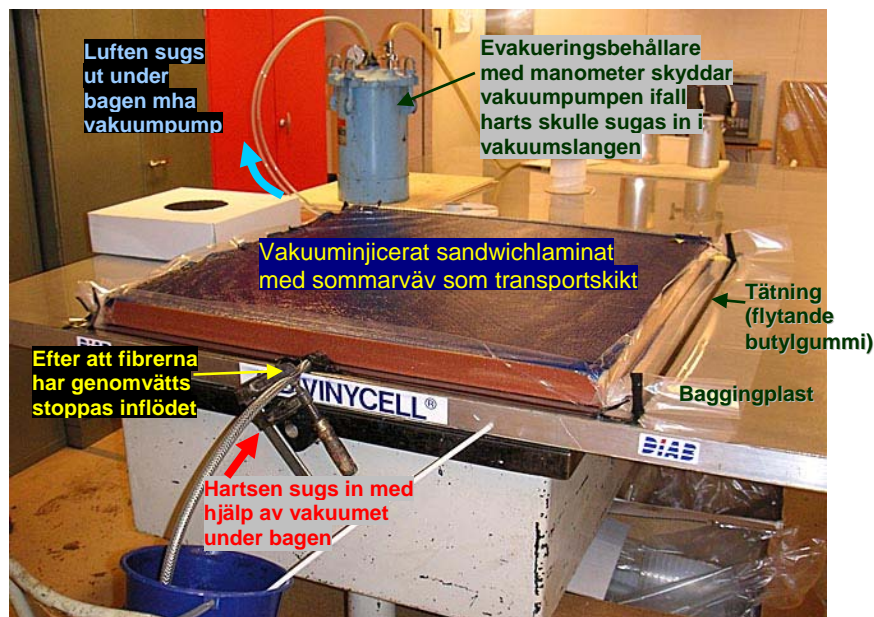
Figur 55, 56: Laminering med vakuumbag, steg 8 och 9



8.4.1.2 Vakuuminjicering

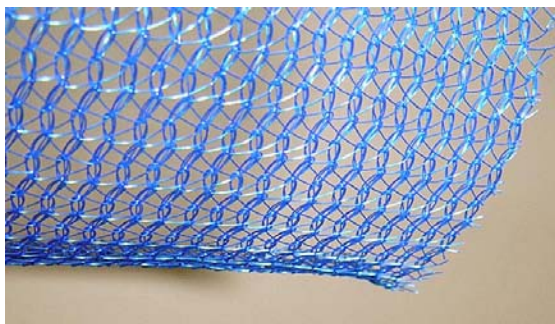
Vakuuminjicering är en flexibel produktionsmetod för att framställa fiberkompositkonstruktioner med goda mekaniska egenskaper och bra ytfinish, mot en sida eller båda. Utformningsmässigt finns stora variationer, allt från små till stora konstruktioner kan vakuuminjiceras. Insidan följer alltid utsidan [27].

Kortfattat bygger vakuuminjicering på att torr fiber läggs i formen. Fibern täcks med en mjuk eller semihård bag. Luften sugs ut under vakuumbagen och genom det vakuum som uppstår sugts harts in och väter fibrerna, *se figur 57*.



Figur 57: Exempel på vakuuminjicering med bag, framställning av sandwichplatta för test vid KTH Lättkonstruktion

Både polyester, vinylester och epoxi förekommer [1], men det krävs att hartsystemet har låg viskositet (är lättflytande) för att underlätta injiceringen och vätningen av fibrerna [8]. För att transportera hartsen krävs normalt ett *transportsikt*. Detta kan ske genom att ett separat transportsikt (*se figur 58*) utnyttjas, som separeras från laminatet med en avrivningsväv (peel-ply), en hartsgenomsläpplig väv vilken inte fäster mot hartsen då den härdar. Hartstransporten kan även åstadkommas genom att man utnyttjar kärnmaterial som har hartsledande kanaler, *se figur 59*.



Figur 58, 59: Exempel på transportsikt för vakuuminjicering
Vänster: "Sommarväv", glest vävd av fiskelineliknande plasttrådar
Höger: Kärnmaterial (Divinycell) med hartsledande kanaler



Genom att metoden sker slutet kan en god arbetsmiljö säkras utan avdunstning av lösningsmedel (främst *styren* som finns i polyester och vinylester) eller att hudkontakt riskeras [11]. Samtidigt minskas miljöbelastningen.

En nackdel med metoden är att det förekommer risk för att det skall uppstå torra partier i laminatet där fibern inte har impregnerats av hartsen [35]. Därför kan det vara nödvändigt att genomföra flera försök och kontroller innan ett fullgott resultat har uppnåtts. Det förekommer även simuleringar av processen i datormiljö för att optimera processen och minimera risken för otillräcklig vätning av fibrerna.

Ett typiskt exempel på konstruktioner som vakuuminjiceras är småbåtskrov.

8.4.1.3 Pre-preg-laminering härdad i autoklav

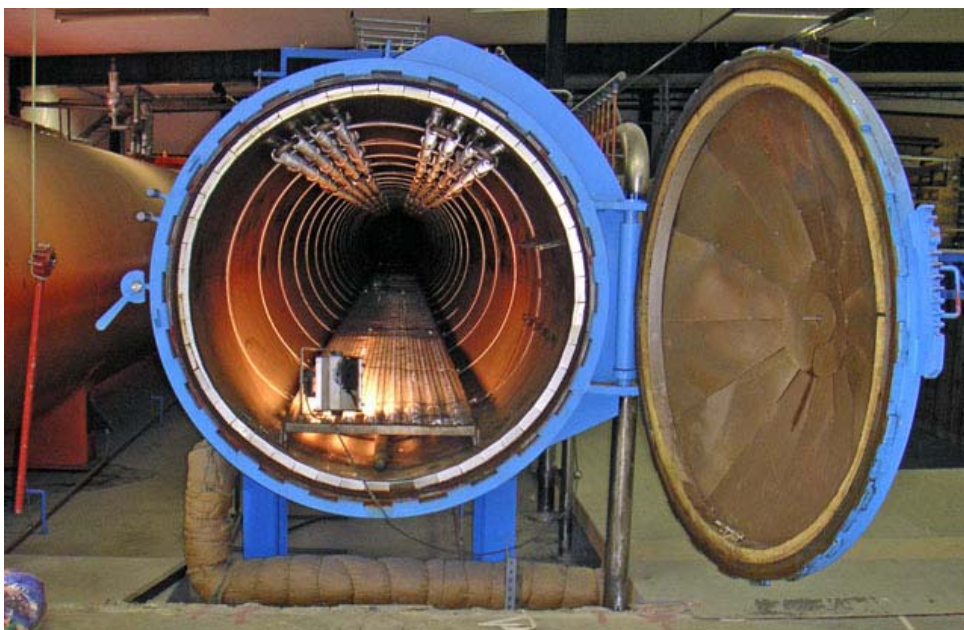
Pre-preg (från engelskans "*pre-impregnated*") innebär att man utnyttjar armeringsfibrer som är förimpregnerad med en harts, vanligtvis epoxi, vars härdning har påbörjats. Genom att höja temperaturen slutförs härdprocessen [11, 7].

Pre-preg-väven förvaras i frysvärld härdprocessen stannas av nästan helt, normalt kan väven förvaras i sex månader [7]. I rumstemperatur går härdprocessen långsamt, normalt kan väven hanteras i några veckor innan epoxin har härdat för långt. Värmehärdningen sker normalt vid en temperatur av 60 till 180 grader, beroende på hartssystemet, under ett tidsförlopp mellan någon och några timmar.

Den pre-preg som utnyttjas av det företag som har utvärderats, *Marström Composite* härdas vid 120 grader i 90 minuter [7].

Pre-preg-väven kan vakuumbaggas (se kapitel 8.4.1.1) men för bästa resultat bör härdningen ske vid högre tryck än det undertryck som vakuumbaggen kan förmå (maximalt ca -1 bar). Genom att utnyttja en **autoklav** (se figur 60), en trycksatt ugn, appliceras tryck på laminatet utan att formen deformeras. Detta eftersom trycket verkar likformigt.

Marström applicerar vanligtvis ett övertryck på ca 8 bar i sina autoklaver [7].

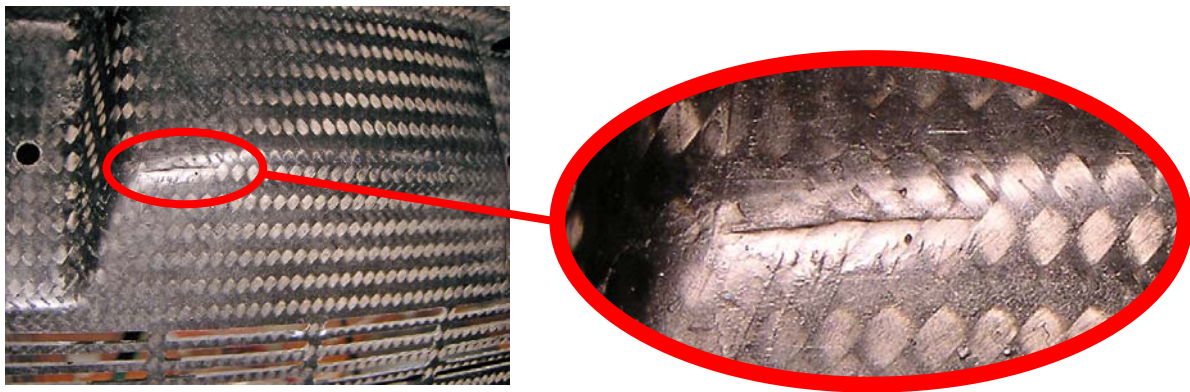


Figur 60: Stor autoklav hos Marström Composite



Eftersom trycket verkar likformigt ställs låga stabilitetskrav på formen [27]. Däremot måste formen klara värmen i autoklaven utan mjukna eller deformeras [7]. Materialets värmeutvidning kan ställa till problem på stora konstruktioner där det är önskvärt att formen och laminatet byggs upp av samma material för att ge lika stor längdutvidgning hos formen som laminatet [7].

Pre-preg-laminering i autoklav utnyttjas för att bygga upp konstruktioner med mycket goda mekaniska egenskaper, med väl kontrollerad hög fiberhalt och hög repeterbarhet [11]. Laminatet får en styrande yta mot formen med relativt god ytfinish men ibland med mindre defekter (*se figur 61*) och en yta med sämre finish som följer. För att uppnå en hög slutfinish krävs normalt lackering, vanligtvis med slipning innan [7].



Figur 61: Exempel på små defekter i pre-preg-laminat som måste sandpappas bort innan lackering för att uppnå perfekt finish, vill höger syns defekten förstörad

Både appliceringen av pre-preg-väven och efterbearbetningen sker normalt för hand, varför metoden kräver hög manuell inblandning och är svår att automatisera och är därmed olämplig för stora serier.

Exempel på konstruktioner som byggs upp med autoklavhärdad pre-preg är flygplansdelar och båt detaljer med högt ställda mekaniska krav, främst riggdetaljer, *se figur 62*.



Figur 62: Uppläggning av pre-preg (kolfiberväv impregnerad med värmehärdande epoxi) till en båtmast hos Marström Composite



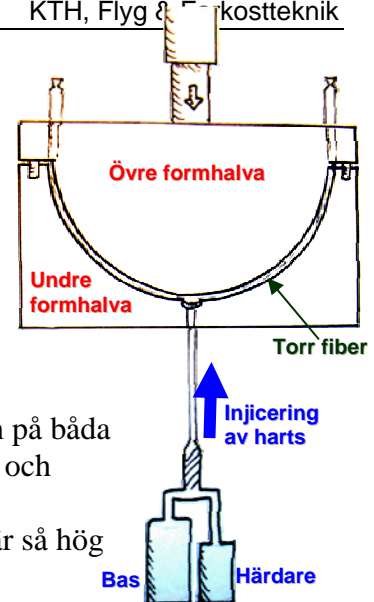
8.4.1.4 RTM

RTM, (eng: *Resin Transfer Mouldning*) [11], tryckinjicering [27], är den högst raffinerade produktionsmetod för bakstycket som har utvärderats.

RTM är den produktionsmetod som går att automatisera i störst omfattning och det är den metod som möjliggör kortast processtid. Verktygskostnaden är dock förhållandevis hög, varför metoden främst lämpar sig för större serier.

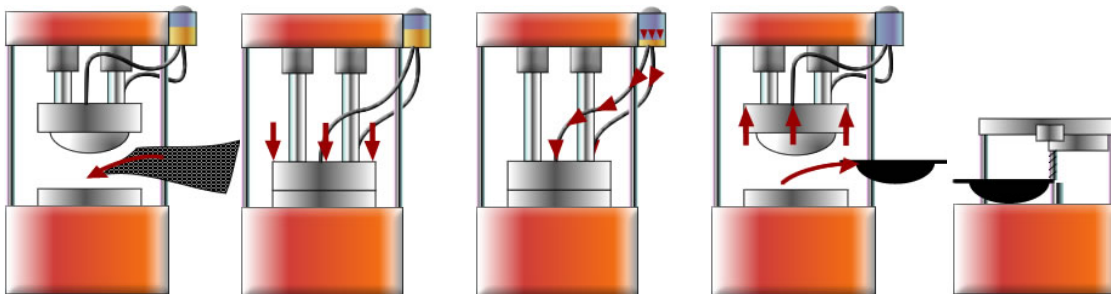
RTM ger till skillnad från övriga metoder hög ytfinish och precision på båda sidorna om laminatet. Detta eftersom en dubbelform med både han- och honsida utnyttjas, se figur 63. Laminatkvaliteten är hög med minimal defektinneslutning och möjlighet till hög fiberhalt [11]. Ytfinishen är så hög att lackning normalt inte krävs [36].

Med hjälp av nedanstående figurer (se figur 64-68) och tillhörande förklaringar beskrivs hur RTM-processen går till steg för steg [37]:



Figur 63: Principskiss för RTM

1. Torr väv som klippts till lämpligt format läggs i den nedre formhalvan. Formen av aluminium är redan uppvärmd för att undvika temperaturförändring, förkorta processtiden och för att ge bättre mekaniska egenskaper för laminatet samt för att minska hartsens viskositet vid injiceringen.
2. Övre formhalvan pressas ner mot den nedre.
3. Hartsen, i form av en värmehärdande härdplast för vilken härdprocessen har påbörjats, pressas in i utrymmet mellan formhalvorna och väven impregneras.
4. Efter att laminatet har härdats lyfts övre formhalva upp och laminatet avlägsnas.
5. Laminatet efterbearbetas, vanligtvis avlägsnas en överskottskant.



Figur 64-68: Principskiss för RTM, Process-stegen 1-5 från vänster till höger.

Copyright: Carbonia, Källa: www.carbonia.se [37]

Normalt utnyttjas verktyg (formar) av fräst aluminium. Detta ger betydligt högre kostnad i förhållande till verktyg i komposit, fräst Ureol (polyuretan) eller epoxi. Motivationen till att utnyttja aluminiumformar är dock följande [36]:

- Hög tålighet, aluminiumverktyg håller för en stor mängd lamineringar innan verktygen behöver underhållas eller repareras. Hållbarheten gör det även möjligt att ha skarpa hörn i konstruktionen utan att riskera att dessa skadas.
- God värmeöverföring gör att verktygen kan hålla en förhöjd jämn temperatur och därmed ge en kort processtid och möjlighet för god impregnering (då hartsens viskositet sjunker vid förhöjd temperatur) samt hög precision.
- Aluminiumverktygen klarar höga tryck vilket är nödvändigt vid injiceringen, framförallt på större konstruktioner.



8.4.1.5 Jämförelse och utvärdering av produktionsmetoder för bakstycket

De fyra produktionsmetoder som ansetts lämpliga för ett bakstycke till eye-trackern i kolfiberkomposit har jämförts och utvärderats. Detta har skett utifrån förväntat resultat av metoderna samt uppgifter från de företag som har fått representera respektive metod. Resultatet återfinns i tabell 1 och 2 med eftervarande kommentarer och slutsatser.

Jämförelse mellan produktionsmetoder för bakstycke i kolfiberkomposit [11, 7, 36, 38]

Produktionsmetod	Tillverkande företag	Lämplig seriestorlek	Fiberhalt [volym-procent]	Luftinneslutningar	Verktyskostnad [SEK]	Styckkostnad [SEK]
Våtlaminering, vakuumbag	Swecomposite	Låg	40-60 %	Medel	10 000 kr*	Med ett lacklager: 3000 kr
Vakuuminjicering	Svensk kompositutveckling	Låg – medel	40-60 %	Medel	Fräst epoxiform: 30 000 kr Fräst aluminiumform: 70 000 kr	Med ett lacklager: 2800 kr
Pre-preg, autoklav	Marström Composite	Låg – medel	50-70%	Låg	10 000 kr*	Med ett lacklager: 2400 kr Med två lacklager: 2800 kr
RTM	Carbonia	Medel – hög	40-60 %	Låg	140 000 kr**	3000 kr

Tabell 1

*) form görs utifrån existerande FFF-plugg efter mindre modifikationer

***) Inner- och ytterform i fräst aluminium

Kommentarer till jämförelsen:

- **Seriestorleken** avser vilken tillverkningsvolym som är mest optimal för respektive produktionsmetod och avseende antalet bakstycken per år:
 - **Låg** motsvarar **under 50** bakstycken per år
 - **Medel** motsvarar **50 till 500** bakstycken per år
 - **Hög** motsvarar **mer än 500** bakstycken per år
 Beräknad volym var då projektet genomfördes 30 stycken eye-trackers per år med möjlighet att snabbt öka till som mest 300 eye-trackers per år (se *Kravspecifikationen, kapitel 5*). Detta innebar att våtlaminering i detta hänseende **inte** var en lämplig metod då produktionsökningsmöjligheten ansågs för liten, medan RTM var en olämplig vid de låga seriestorlekar det kunde bli frågan om, beroende på hur väl eye-trackern skulle tas emot på marknaden samt eye-tracker-marknaden som helhet och Tobii:s framgångar.
- **Luftinneslutningar** i ett laminat ger sämre mekaniska egenskaper, en plats där ett brott kan påbörja [1], detta är underordnat för kompositbakstycket, problemet är istället att luftinneslutningar försämrar resultatet vid vattenskärning (se *information om vattenskärning i kapitel 9.1.1.1*).



Utvärderingsmatris – produktionsmetoder för bakstycke i kolfiberkomposit

Produktionsmetod	Kvalitet	Finish	Verktogs-kostnad	Styck-kostnad	Flexibilitet	Sammanvägt betyg
Våt laminering, vakuumbag	2	1-3	5	1	5	58-66
Vakuuminjicering	3	3	2-3	2	4	55-59
Pre-preg, autoklav	5	2-3	4	2-3	4	65-72
RTM	5	5	1	1	1	47
Viktning	3	4	4	3	5	

Tabell 2

Kommentarer till utvärderingsmatrisen:

- **Kvalitet** avser laminatets mekaniska kvalitet. Generellt ger en hög fiberhalt, en låg andel defekter och luftinneslutningar samt en mekaniskt stabil matris en hög mekanisk kvalitet på laminatet.
- **Finish** avser laminatets ytfinish på formsidan *innan* eventuell efterbearbetning, slipning och lackering, samt behovet på efterbearbetning. Finish avser även måttnoggrannheten på formsidan men även avigsidan av laminatet. Vid våtlaminering är det möjligt att förbättra ytfinishen genom att laminera en gelcoat närmst verktyget varför betyget varierar. Då det gäller pre-preg-laminering kan ytfinishen variera beroende vilken väv som väljs och dess matrishalt samt hur hög prioritet läggs på att maximera fiberhalten varför betyget varierar.
- **Verktygskostnad** avser kostnaden för att framställa erforderliga verktyg, formar och kringutrustning, för att kunna producera bakstycken. Ett högt betyg innebär en låg kostnad och vice versa. I betyget har det vägts in att det vid analysen redan fanns en plugg att tillgå framställd genom *friformsframställning (FFF)*, (se kapitel 8.6.1). Denna kunde användas vid pre-preg-laminering hos *Marström Composite* [7], samt vid våtlaminering hos *Swecomposite* [38] för att ta fram en form men bedömdes inte duga vid framställning av en form för vakuuminjicering hos *Svensk kompositutveckling*. Vid vakuuminjicering var det möjligt att gå från en enkel form med mjuk bag till en semihård vid större serier vilket gett ett varierande betyg. Verktygskostnaden vid RTM är mycket hög eftersom det krävs både en ytter- och innerform [36], båda frästa i aluminium.
- **Styckkostnad** avser kostnaden för att framställa detaljer inklusive efterbearbetning (undantaget vattenskarvning). Kostnaden baserad på uppgifter från respektive tillverkare och är beräknad för bakstycken bestående av två lager kolfiberväv av HS-kvalitet (T300, T600, T700 eller motsvarande) med ytvikten 600-650 g/m² laminerad med optiskt klar epoxi. Ett högt betyg avser en låg kostnad och vice versa. Styckkostnaden kan variera kraftigt mellan olika seriestorlek (vilket vid förfrågan var bestämd till 10 bakstycken per beställning och minst 30 bakstycken första året). Det var frågan om kostnadsförslag och inga rena offerter varför den slutgiltiga kostnaden skulle kunna variera, troligtvis främst uppåt. Troligtvis var *Carbonia* med produktionsmetoden RTM den som gav ett kostnadsförslag med minst utrymme för ökade slutgiltiga kostnader vilket tillsammans med en relativt låg seriestorlek i förhållande till vad som är lämpligt för produktionsmetoden kunde vara en förklaring till den höga styckekostnaden, trots minimala krav på efterbearbetning.



Vid pre-preg-laminering hos *Marström* styrdes kostnaden till stor del beroende på behovet av efterbearbetning [7], främst antalet nödvändiga lacklager (1 till 2) med slipning mellan vilket är orsaken till det varierande betyget. Inte heller *Svensk Kompositutveckling* med produktionsmetoden vakuuminjicering kunde garantera vilket behov av efterbearbetning som skulle krävas, bedömningen var 1-2 lacklager, vilket orsakat det varierande betyget.

- **Flexibilitet** avser främst möjligheten att enkelt, snabbt och kostnadseffektivt kunna ändra på verktyget vid en förändring av t.ex. ingående komponenter i eye-trackern. Även hur snabbt nollserie skulle kunna tas fram, samt möjligheten att kunna förändra seriestorleken har vägts in.
Våtlaminering är den enklaste metoden och ställer lägst krav på formen, vilket gör modifikationer enkla, vilket ger stor flexibilitet. Vakuuminjicering har framförallt fått ett högt betyg eftersom metoden erbjuder stor möjlighet att variera seriestorleken. Orsaken till att pre-preg-laminering har fått högt betyg var att *Marström* vid tillfället lovade snabbast leverans av nollserien [40]. RTM är den produktionsmetod med lägst flexibilitet eftersom verktyget består av två formar i aluminium av vilka modifikationer endast kan genomföras i mycket begränsad omfattning [36].
- Alla betyg har **viktats** utifrån bedömda behov för bakstycket. Möjligheten att snabbt få fram ett bakstycke med möjlighet att förändra under vägen, dvs flexibiliteten hos produktionsmetoden har vägts högst. Lägst har finishen vägts, inte pga kravet på slutfinish är låg utan eftersom slutfinishen ändå kan bli god om bakstycket lackeras väl, samtidigt som bakstycket designades för att bara ha styrande funktionsytor på utsidan, dvs formsidan.
- Betygen har räknats samman och multiplicerats med viktvärdena för att åstadkomma **sammanvägda betyg** som visar hur väl respektive produktionsmetod är lämpad för bakstycket. Bäst betyg med små marginaler har pre-preg-laminering hos *Marström Composite* fått.

Slutsats

Pre-preg-laminering och härdning i autoklav har bedömts vara den lämpligaste produktionsmetoden med *Marström Composite* som tillverkare. Avgörande var en kombination av hög flexibilitet, ett löfte om att de snabbt skulle få fram en nollserie och en följande produktserie, möjlighet till förändring av formen, en låg formkostnad (eftersom de ansåg det möjligt att utgå från den redan existerande *FFF-pluggen* (se figur 96 och 97) [7] i kombination med ett relativt lågt offerterat styckepris (trots en omfattande efterbearbetning) och hög laminatkvalitet vilket framförallt underlättar vid vattenskarvning [23, 28-29]. De kunde även visa exempel på hög ytfinish efter att ha klarlackat motsvarande detaljer.



8.4.2 Material och produktionsmetoder för framstycket

För att underlätta montagearbetet fanns det av Tobii ett önskemål att en stor del av komponenterna monteras mot framstycket. Det gäller *TFT-modulen*, eye-trackingkomponenterna, kretskorten, styrkort och högtalarna.

Målet från början var att konstruera framstycket i samma material som bakstycket, i kolfiberkomposit. Detta för att uppnå minimal vikt, skärmande egenskaper och möjlighet att få ett attraktivt utseende med ”kolfiberlook”.

För att åstadkomma tillräcklig kylning för komponenterna, framförallt IR-belysningen vars livslängd kraftigt försämras vid temperaturhöjning [15], krävdes det separata kylplåtar. Det skulle även krävas separata fästdetaljer för andra komponenter i eye-trackern. Därtill fanns det ett krav att det inte fick synas några skruvar eller andra fästdon framifrån.

Sammantaget visade det sig praktiskt mycket svårt att konstruera framstycket i kolfiberkomposit.

Av orsaker som listas nedan krävdes det istället att framstycket konstruerades av metall:

- Enkelt att åstadkomma **gängor** för att fästa detaljer och för att skruva ihop fram- och bakstycket och därmed göra att man inte ser några fästdetaljer framifrån
- Möjlighet till **kylning** med stor kylvyta på utsidan, inga separata kylplåtar på insidan behövs

Framförallt en metall är lämplig för konstruktioner som eye-trackerns framstycket, nämligen **aluminium**. Aluminium är en lättmetall och har därmed en relativt låg densitet (ca $2,7 \text{ kg/dm}^3$) [6], är lättbearbetat, lättgjuten och är förhållandevis billig. Aluminium går återvinna vilket gör den miljövänlig och är till stor fördel vid produktion som ger mycket materialspill som t.ex. fräsning.

Tre produktionsmetoder för framstycket i aluminium har ansetts lämpliga, framförallt utifrån de funktionskrav som har ställts upp, varvid dessa har utvärderats:

- **Pressgjutning**
- **Gipsgjutning**
- **CNC-fräsning**

Därtill har en kombination mellan den andra och tredje produktionsmetoden utvärderats, en gipsgjutning av utsidan med en CNC-urfräsning av insidan.

8.4.2.1 Pressgjutning

Pressgjutning är en vanlig produktionsmetod, framförallt för mindre detaljer med stora seriestorlekar. Den smälta aluminiumlegeringen (gjötet) pressas in i hålrummet mellan två eller flera formhalvor under ett mycket kort tidsintervall, ett s.k. skott. Kraven på verktyget (formen) är höga då det utsätts för stora tryck, höga krafter och högt slitage [39]. Därför måste verktyget tillverkas av stål som härddas samt vara grovt dimensionerad. Verktygskostnaden blir därmed hög. Detta gäller speciellt verktyg för framställning av stora detaljer.

Processtiden är kort och styckkostnaden vid stora serier låg.

Noggrannheten och ytfinheten är god.



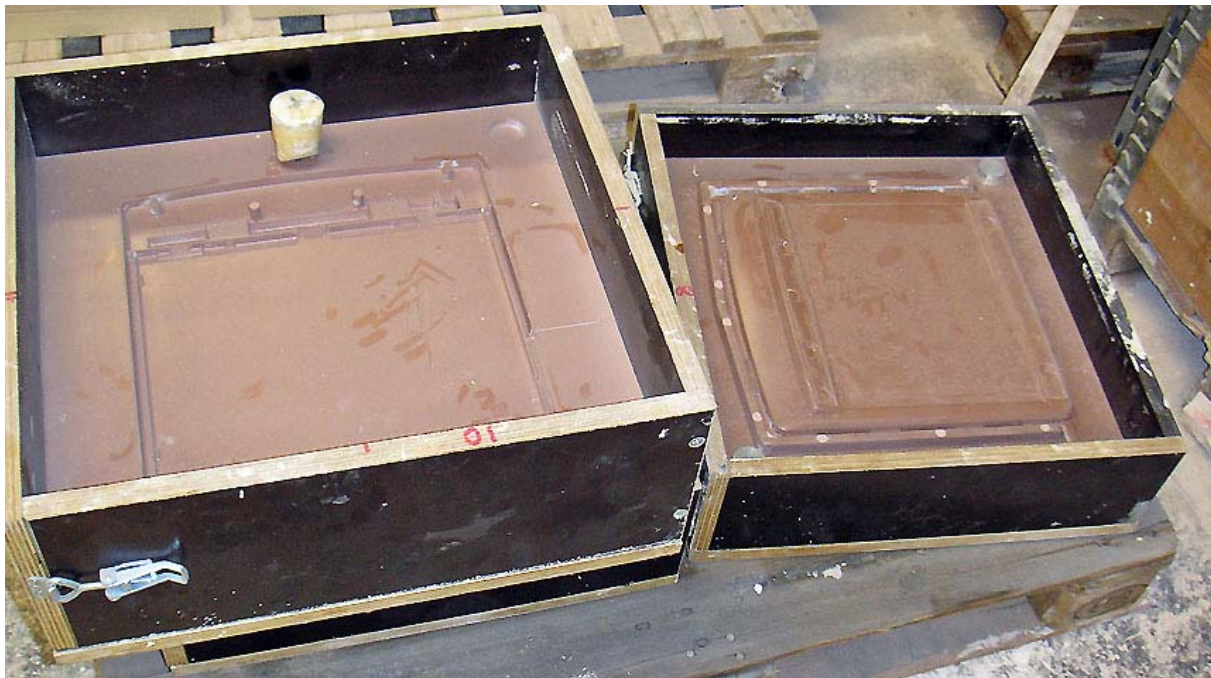
Pressgjutning som produktionsmetod för framstycket

Rent funktionellt vore pressgjutning av aluminium en lämplig produktionsmetod för eye-trackerns framstycke. Den planerade tillverkningsvolymen (30-100 eye-trackers per år) bedöms dock på tok för låg. Detta eftersom verktygskostnaden beräknas uppgå till cirka en miljon SEK [21], utifrån jämförelse med liknande framstycken (*se tabell 3 och kommentar*). Produktionsmetoden är inte heller tillräckligt flexibel och tillåter inte förändringar av framstyckets utformning eller en snabb framställning av en nollserie.

8.4.2.2 Gipsgjutning

Information sammanställd främst utifrån presentation av och diskussion med [21]:

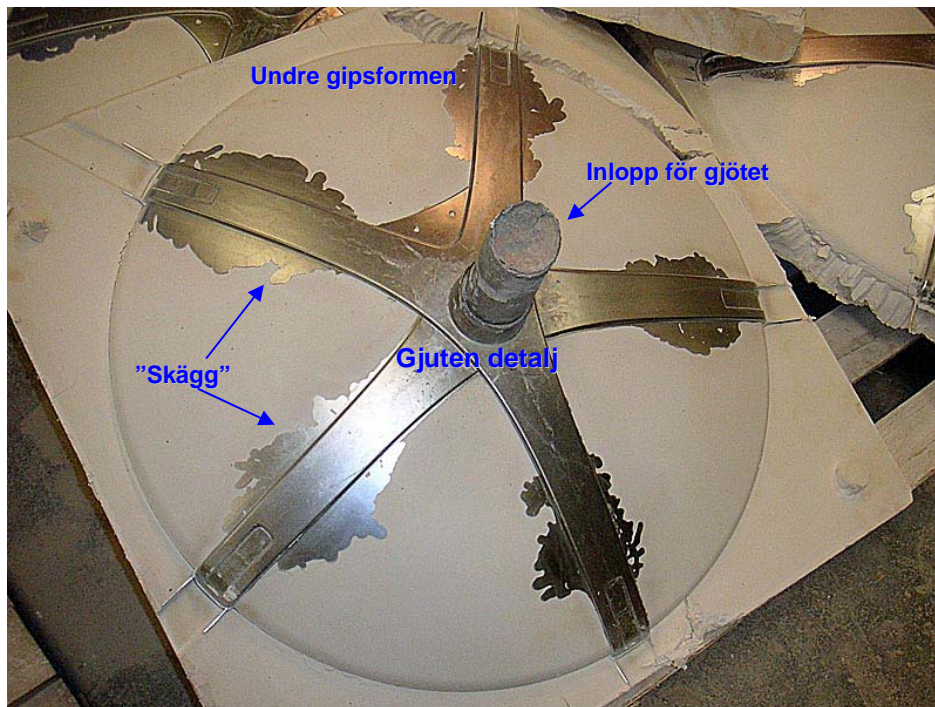
Gipsgjutning är en gjutmetod lämpad för små till medelstora serier där hög ytfinhet önskas. Den främsta fördelen med metoden är att det ställs låga krav på verktygen (formarna), varför kostnaden blir låg även för stora detaljer. Verktygen behöver endast klara gipsavgjutningar. Ofta fräses verktygen fram ur Ureol, en hård polyuretan, *se figur 69*.



Figur 69: Exempel på gjutformar till monitorframstycke (till MyTobii P10), insides och utsides i fräst Ureol, för framställning av gipsformar för gipsgjutning av aluminium hos MM Tech cast

I ureolverktygen gjuts gipsformar. Gipsformarna tillåts förhärda under några timmar, plockas därefter bort från ureolverktygen och sluthärdas i ugn under några dygn innan de är klara att använda.

Den smälta aluminiumlegeringen (gjötet) hålls i gipsformarna som har försetts med vakuumsugproppar för att underlätta att metallen flyter ut i alla hålrum. Gipsen är tillräckligt porös för att leda luften men samtidigt tät nog för att inte få med aluminiumgjötet. Gipsformen spricker under tiden gjötet svalnar, resterna avlägsnas för hand och spolas bort med vatten. Så kallat "skägg" (*se figur 70*), överskottsmetall som kommit in i gliporna mellan formhalvorna samt inloppet för gjötet och andra defekter slipas bort för hand.



Figur 70: Gipsgjuten detalj (en prototypserie av en kontorsstolsfot) hos MM Tech cast som fortfarande sitter kvar i undre gipsformen, innan att "skägg" och gjötinlopp har avlägsnats

Ofta måste detaljen som gipsgjutits även riktas för hand. Detta eftersom materialet deformeras oliksidigt under avsvälmandet vilket ger deformationer.

Gipsgjutning är förhållandevis arbetskrävande metod med små möjligheter till automatisering. Detta gäller speciellt om risken för deformation är stor och det krävs mycket riktighetsarbete, vilket både tar tid och kräver kunskap av operatören. Styckekostnaden vid gipsgjutning blir därmed hög.

Gipsgjutning som produktionsmetod för framstycket

Storleksmässigt och om man ser till den låga seriestorleken gör gipsgjutning till ett bra val för framstycket. Styckekostnaden är visserligen relativt hög men verktygskostnaden låg. Flexibiliteten är för att vara en gjutmetod relativt hög, detta då det är möjligt att göra ändringar direkt i ureolverktyget eller *CNC-fräsa* fram alternativt *friformsframställa* (se kapitel 8.6.1) en ny detalj som limmas in i ureolverktyget.

Problemet med gjutmetoden för att framställa framstycken till eye-trackern är att risken för deformation vid gjutningen har bedömts vara extra stor [21]. Detta pga. utformningen med de långa slanka ramsidorna blandat med partier med tjockare gods. Samtidigt är kravet på precision för framstycket relativt hög med många funktionsytor och känsliga detaljer direkt mot framstycket, främst TFT-elementets skärmyta.



8.4.2.3 CNC-fräsning

Information sammanställd främst utifrån presentation av och diskussion med [10]:

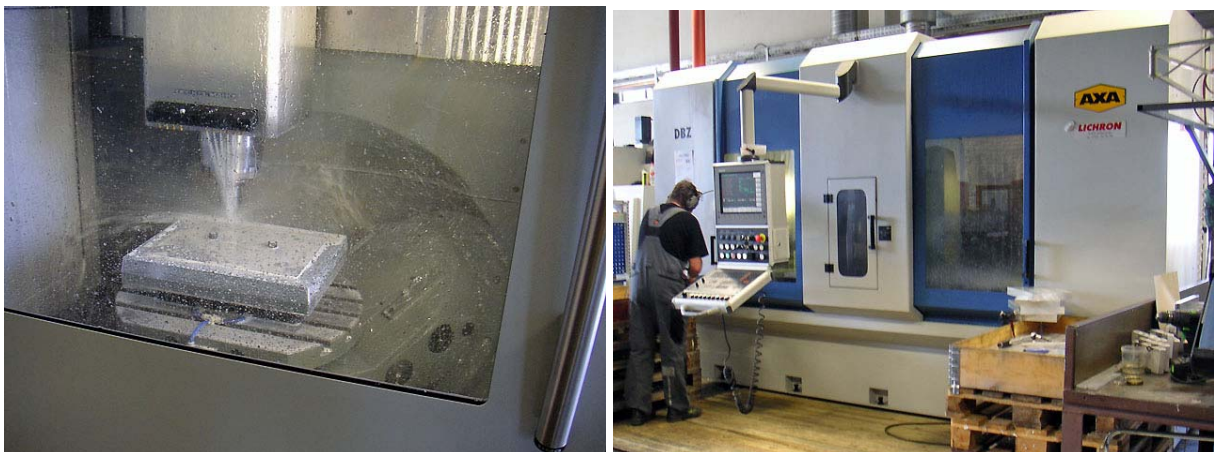
CNC-bearbetning, (från engelskans *Computer Numeric Controlled*) innebär att en fleroperationsmaskin, i detta fall en fräs, elektroniskt styrd följer ett program för att åstadkomma önskad urfräsning. Fräsning i aluminium kan ske från ett i förväg format stycke (via gjutning, smidning eller pressning) eller från ett homogent aluminiumstycke (gjutet eller strängpressat).

CNC-fräsning används från enstyckstillverkning, form- och prototypstillverkning till medelstora serier där framförallt hög precision och flexibilitet krävs. Metoden utnyttjas även för att framställa aluminiumdetaljer i höghållfasta legeringar (*EN-7075* och *EN-2014*).

Trots att CNC-fräsning är en högt automatisera produktionsmetod är den relativt dyr beroende på hög maskinkostnad och mycket spill (se figur 73). Kostnaden kompenseras dock av produktionsmetodens flexibilitet, en normalt låg startkostnad eftersom inga specialverktyg krävs utöver eventuella fixturer, att det snabbt går att få igång en produktion eller en ändring och att detaljer som framställs normalt inte behöver efterbearbetas i någon större omfattning.

Fräsningen sker i normalt antingen i tre axlar: längsled, sidled och höjdlid (X, Y, Z-led) eller i fler axlar, där övriga axlar innebär vridning i olika led av antingen arbetsstycket eller fräshuvudet. 5-axlig fräsning (se figur 71) innebär att komplexa tredimensionella former med lutande ytor kan åstadkommas som t.ex. formen av en propeller. Ytterligare axlar innebär att fleroperationsmaskinen även kan svarva.

3-axlig fräsning är normalt betydligt billigare än fräsning med fler axlar, främst programmeringskostnaden men även maskinkostnaden. En 3-axlig fleroperationsmaskin (se figur 72) är normalt större och robustare än motsvarande fleroperationsmaskin med fler axlar.



Figur 71, 72:

Vänster: Fräsning i 5-axlig fleroperationsmaskin hos LG Produktion, fräshuvudet är fast medan arbetsstycket flyttar och vrider sig

Höger: Dubbel 3-axlig fleroperationsmaskin hos LG produktion



Vid CNC-fräsning uppstår mycket spill, *se figur 73*. Detta gäller framförallt vid fräsning som utgår från en homogen kloss. Spillet kan dock återvinnas till ny aluminium genom omsmältning vilket i viss mån minskar kostnaden, men framförallt minskar resursutnyttjandet eftersom framställande av aluminium är en mycket energikrävande process.



Figur 73. Aluminiumsspånor efter CNC-fräsning hos LG produktion, spillet återvinns och smälts om till ny aluminium

CNC-fräsning som produktionsmetod för framstycket

CNC-fräsning är en lämplig produktionsmetod för framstycket till eye-trackern om man ser till den låga planerade seriestorleken, precisionskraven och kraven på flexibilitet, att snabbt kunna komma igång och att kunna förändra framstycket om komponenterna ändras. Metoden erbjuder även en intressant möjlighet att kunna ta fram kundanpassade eye-trackers.

Det som talar emot CNC-fräsning som produktionsmetod för framstycket är främst storleken och utformningen. Det förekommer få fleroperationsmaskiner med fler axlar än tre som är tillräckligt stora för att kunna fräsa ut hela framstycket. Samtidigt krävs 5-axlig fräsning för delar av framstycket, komponentupphängningen under TFT-elementet, som lutar i förhållande till övriga framstycket. Därför kan det krävas att framstycket delas upp i två delar, en större huvudram som fräses 3-axligt och en mindre komponentdel under TFT-elementet som fräses 5-axligt.

8.4.2.4 Gipsgjutning av utsidan, CNC-fräsning av insidan

Information sammanställd främst utifrån presentation av och diskussion med [10] och [21]:

Genom att kombinera gipsgjutning av de ytor där låga precisionskrav ställs, i praktiken utsidan av framstycket, och fräsa hela eller delar av insidan vill man uppnå fördelar från båda produktionsmetoderna och undvika deras nackdelar.

Det kostsamma riktighetsarbetet efter gjutningen bör inte vara nödvändigt samtidigt precisionen och flexibiliteten kraftigt förbättras då alla funktionsytor på insidan av framstycket fräses. Maskintiden blir mindre i förhållande till en ren fräsning från en homogen aluminiumkloss då endast insidan fräses, samtidigt som materialutnyttjandet förbättras och mängden spill minskas drastiskt.

De främsta nackdelarna i förhållande till ren fräsning från en homogen aluminiumkloss är att processen kräver längre starttid, att det gipsgjutna framstycket normalt är betydligt svårare att spänna upp i fleroperationsmaskinen och att det därför kan krävas flexibla fixturer och ökad tid för uppspanningsarbetet. Flexibiliteten är inte heller lika hög som vid ren fräsning. Problemen med att fräsa en så stor detalj som framstycket mer än 3-axligt är gemensam för ren fräsning. Det kan därför krävas att framstycket gjuts i två separata delar eller att en del gjuts och en del fräses från en ren aluminiumkloss.



8.4.2.5 Jämförelse och utvärdering av produktionsmetoder för framstycket

De fyra produktionsmetoder som ansetts lämpliga för ett framstycke till eye-trackern i aluminium har jämförts och utvärderats. Detta har skett utifrån förväntat resultat av metoderna samt uppgifter från de företag som har fått representera respektive metod. Resultatet återfinns i tabell 3 och 4 med eftervarande kommentarer och slutsats.

Jämförelse mellan produktionsmetoder för framstycke i aluminium [10, 21, 39]:

Produktionsmetod	Företag	Lämplig seriestorlek	Verktögs-kostnad [SEK]	Program Kostnad** [SEK]	Styck-kostnad [SEK]
Pressgjutning	Mönsterås Metall	Hög	1 000 000* kr	0	200* kr
Gipsgjutning (med fräsning av vissa funktionsytor)	MM Tech cast	Låg – medel	60 000 kr	20 000 kr	2000 kr
CNC-fräsning	LG-Produktion	Låg – medel	0	70 000 kr	3000 kr
Gipsgjutning av utsidan och CNC-fräsning av insidan	MM Tech cast och LG-produktion	Låg – medel	60 000 kr	40 000 kr	2500 kr

Tabell 3

*) Kostnadsuppgifterna kommer JLT Mobile vid utvecklingen av ett motsvarande framstycke till en tablett-PC

***) I programmeringskostnaden ingår eventuella kostnader för fixturer

Kommentarer

- **Seriestorleken** avser vilken tillverkningsvolym som är mest optimal för respektive produktionsmetod och avseende antalet framstycken per år:
 - **Låg** motsvarar **under 50** framstycken per år
 - **Medel** motsvarar **50 till 500** framstycken per år
 - **Hög** motsvarar **mer än 500** framstycken per år

Beräknad volym var då projektet genomfördes 30 stycken eye-trackers per år med möjlighet att snabbt öka till som mest 300 eye-trackers per år (se *Kravspecifikationen, kapitel 5*). Detta innebär pressgjutning **inte** var en lämplig produktionsmetod vid de låga seriestorlekarna det kunde bli frågan om, speciellt om man väger in den mycket höga verktygskostnaden.
- Kostnaderna för verktyg, programmering och styckkostnaden baserad på uppgifter från respektive tillverkare. För pressgjutning kommer uppgifter från JLT Mobile [40] och [10] kring utvecklingen av ett motsvarande framstycke till en mindre tablett-PC där storleksskillnaden har vägts in.

Verktögs-kostnaden vid pressgjutning är mycket hög eftersom det ställs stora krav på formen pga. de stora påfrestningar verktyget utsätts för under gjutningen. I gengäld är styckkostnaden vid gipsgjutning mycket låg pga. den höga automatiseringsgraden och korta processtider.

Programmeringskostnaden CNC-programmet som krävs för fräsning vid serieproduktion i aluminium är mycket högre än den som krävs för enstaka formfräsning i ureol eller epoxi [10]. Detta beror på att automatiska *CAM-verktyg*, direktkonverteringar från CAD-modellen till *NC-kod* kan utnyttjas vid formtillverkningen trots att detta inte ger ett optimalt fräsförlopp. Vid framtagning av *NC-kod* för serieproduktion i aluminium krävs en stor manuell insats vid omvandling av *CAD-modellen* till *NC-kod* [10].



Utvärderingsmatris – produktionsmetoder för framstycke i aluminium

Produktionsmetod	Kvalitet	Precision	Verktygs- och program kostnad	Styck- kostnad	Flexibilitet	<i>Sammanvägt betyg</i>
Pressgjutning	3	3	1	5	1	42
Gipsgjutning (med fräsning av vissa funktionsytor)	2	1	5	3	2	47
CNC-fräsning	5	5	4	1	5	74
Gipsgjutning av utsidan och CNC- fräsning av insidan	2	4	3	2	3	53
<i>Viktning</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>5</i>	

Tabell 4

Kommentarer till utvärderingsmatrisen:

- **Kvalitet** avser aluminiumlegeringens mekaniska kvalitet. Generellt har aluminiumgjutlegeringar sämre mekaniska egenskaper än de aluminiumkvaliteter som utnyttjas vid CNC-fräsning [6]. Gipsgjutning ger sämre mekanisk kvalitet än pressgjutning eftersom materialet innehåller mer defekter [21].
- **Precision** avser ytnoggrannhet och måttnoggrannheten, både på funktionsytor och synliga ytor.
- **Verktygs- och programkostnad** avser kostnaden för att framställa erforderliga verktyg, formar och kringutrustning inklusive eventuell programmeringskostnad vid bearbetning och fixturer, för att kunna producera framstycken. Ett högt betyg innebär en låg kostnad och vice versa.
- **Styckkostnad** avser kostnaden för att framställa detaljer inklusive efterbearbetning (undantaget lackering). Ett högt betyg innebär en låg kostnad och vice versa.
- **Flexibilitet** avser främst möjligheten att enkelt, snabbt och kostnadseffektivt kunna ändra på framstycket, främst på insidan. Detta kan bli aktuellt då vissa ingående komponenter i eye-trackern kan ändras utan förvarning från leverantören. Det kan även vara aktuellt vid kundanpassning av eye-trackern. Även hur snabbt en nollserie skulle kunna tas fram, samt möjligheten att kunna förändra seriestorleken har vägts in. CNC-fräsning erbjuder störst flexibilitet. Vid förändring behöver endast programmet förändras, det finns inga verktyg som behöver ändras, vilket är fallet för gjutmetoderna. Begränsade förändringar är dock möjliga att göra för kombinationsmetoden där insidan fräses så länge förändringen sker inom det frästa området. När det gäller gipsgjutning går det i viss omfattning förändra verktygen för antingen direkt i verktyget eller genom att fräsa en ny detalj som limmas in i det gamla verktyget [21]. Det går även relativt snabbt att fräsa nya gipsgjutningsformar. Pressgjutningsverktygen är generellt inte möjliga att ändra på och att ta fram nya tar mycket tid och är förenad med en hög kostnad.



- Alla betyg har **viktats** utifrån bedömda behov för bakstycket. Möjligheten att snabbt få fram ett framstycke med möjlighet att förändra den, dvs. flexibiliteten hos produktionsmetoden har vägts högst. Lägst har kvalitén vägts, detta eftersom framstycket endast utsätts för begränsad mekanisk åverkan samtidigt som styvheten för de olika aluminiumlegeringarna inte skiljer sig nämnvärt.
- Betygen har räknats samman och multiplicerats med viktvärdena för att åstadkomma **sammanvägda betyg** som visar hur väl respektive produktionsmetod är lämpad för bakstycket. Bäst betyg med stor marginal har CNC-fräsning hos *LG-produktion* fått.

Slutsats

CNC-fräsning har bedömts som den lämpligaste produktionsmetoden för framstycket.

Avgörande för valet av produktionsmetod var en kombination hög flexibilitet och hög precision. Det företag som representerar metoden, *LG-produktion*, har stor erfarenhet av produktion av liknande detaljer, främst chassin till s.k. tablet-PC:s [40] vars framstycke till utformning delvis liknar eye-trackerns framstycke. Detta har även bedömts vara en stor fördel.

8.4.3 Sammansättning mellan fram- och bakstycket

Vid övergången mellan eye-trackerns kolfiberkompositbakstycke och aluminiumframstycke är det viktigt att säkerställa god elektrisk kontakt för att möjliggöra att eye-trackern blir **EMC-godkänd** [15, 32] och elektromagnetiskt varken stör omgivningen eller blir störd av externa störningskällor.

Samtidigt bör övergången vara en estetisk tilltalande och mekanisk tillförlitlig så att det är enkelt att montera samman eye-trackern och att sammansättningen mellan fram- och bakstycket inte rubbas vid hantering av eye-trackern.

Det finns flera alternativ för sammansättningen mellan eye-trackerns fram- och bakstycke. Lösningalternativen styrs delvis av vilken produktionsmetod för fram- och bakstycket som väljs. Genom att studera liknande konstruktioner, skissa på alternativ och mäta kontaktöverföringen (*se kapitel 8.4.3.1*) har det bästa alternativet uttrönts.

För att få elektrisk kontakt mellan fram- och bakstycket är det avgörande att framstyckets metall kommer i kontakt med kolfibrerna i bakstyckets kompositmaterial.

Kontaktöverföringen kan ske direkt men det finns ett antal alternativ för att förbättra kontaktöverföringen [15].

Följande alternativ har identifierats för att säkerställa elektrisk kontakt mellan fram- och bakstycket:

- **Fabric-over-foam (FOF)** – mjukt ledande skärmmaterial bestående av metallväv utanpå en skumgummikärna (*se figur 75*)
- **Koppar-berylliumfingrar** – ledande material med vassa fingrar som är tänkta att sticka in i materialet och därmed ta sig igenom ett ickeledande oxidskikt hos metaller eller ett ytskikt med enbart matris hos en fiberkomposit med ledande fiber (*se figur 75*)
- **EMC-tejp** – aluminiumtejp med ledande häftämne
- **Dispensering av ledande pasta** (*se kapitel 8.4.3.1*)



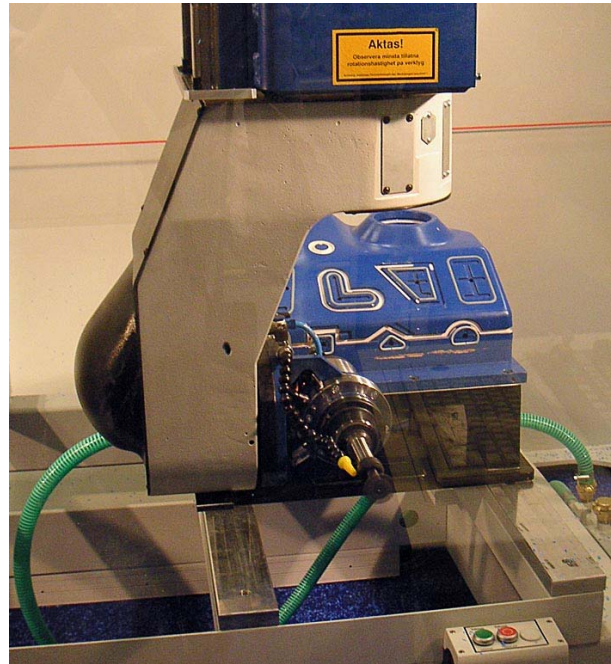
8.4.3.1 Dispensering

Information sammanställd främst utifrån informationen av och diskussion med [13]:

Vid *dispensering* ”splitsar” en numeriskt styrd maskin ut strängar av pasta. Pastan värmehärdas normalt därefter och bildar silikongummiliknande elastiskt material. De dispenserade strängarna kan fungera som miljöskydd men även leda ström och då fungera som *EMC-list*.

Metoden innebär hög automatiseringsgrad och ger hög noggrannhet och är därför lämplig vid produktion.

Om dispensering skulle utnyttjas som metod för att säkerställa ledning mellan fram- och bakstycket för den aktuella eye-trackern bedöms det som lämpligast att applicera den ledande pastan på de ytor av framstycket som möter bakstycket.



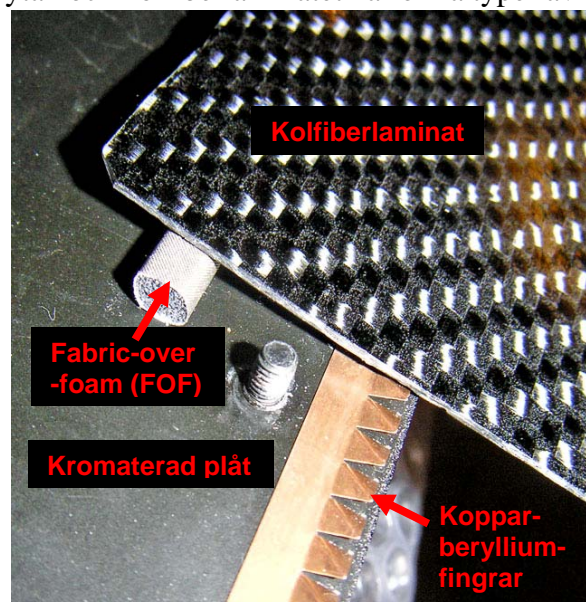
Figur 74: Dispensering av pasta, ledande och/eller omgivningsskyddande

8.4.3.2 Mätning av kontaktöverföring mellan kolfiberkomposit och metall

För att utröna bästa metod för att åstadkomma säker kontakt mellan bakstycket i kolfiberkomposit och framstycket i metall har en serie mätningar genomförts. Vid dessa mätningar har motståndet (i ohm = Ω) mätts med en multimeter mellan en kromaterad plåt och två olika kolfiberkompositplattor. Mellan metallytan och kolfiberlaminatet har olika typer av EMC-lister placerats. EMC-lister är ledande material vars syfte är att maximera ledningsförmågan vid skärmning. Ledning mot olika delar av laminatet har även testats, mot den avsågade kanten, mot oslipad yta och mot slipad yta.

Ledningsförmågan hos den kromaterade plåtytan motsvarar kromaterad aluminium och anses även motsvara den hos *blästrad* aluminium [10] (gäller ej gjutna legeringar där motståndet kan vara högre pga. defekter i materialet [21]).

Lågt motstånd mellan fram- och bakstycket är eftersträvningsvärt för att säkerställa skärmningsförmågan och för att maximera möjligheten för eye-trackern att klara EMC-test [9, 32].



Figur 75: Kolfiberkomposit (våtlaminerat) mot kromaterad plåt, exempel på EMC-list: fabric-over-foam (vänster), koppar-berylliumfingrar (höger)



Våtlaminerat kolfiberlaminat

Kolfiberplatta: Ett lager 650g/m^2 2×2 *twill* $[0^\circ/90^\circ]$, våtlaminerad med epoxi (öppen rumstemperaturhärdning), $V_f \approx 0,3$, $l = 39$ cm, $b = 11,5$ cm

Laminatsida	Skärm-material	Motstånd [Ω]	Kommentar
Laminatkant	Direkt mot metallen	10 – 30	
Laminatkant	FOF	10 – 30	<i>Kontakten försämras (motståndet ökar) vid högt tryck, antagligen eftersom skärmlisten då trycks mot laminatets kanter (som har hög epoxihalt) snarare än laminatets kärna med högre halt av ledande kolfiber</i>
Oslipat laminat	Koppar-berryliumfingrar	30 – 150	<i>Motståndet beror med kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd</i>
Slipat laminat	Koppar-berryliumfingrar	200 – 1000	<i>Motståndet beror på hur väl ytan har rengjorts och kontaktrycket, bättre rengöring och högre tryck ger lägre motstånd</i>
Oslipat laminat	FOF 5x5 mm	15 – 25	<i>Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd. Motståndet beror även på vilken plats på laminatet som FOF:en applicerad</i>
Slipat laminat	FOF 5x5 mm	300	
Oslipat laminat	FOF 20x4 mm	10 – 30	<i>Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd, mycket lågt tryck krävs innan det blir kontakt mellan laminatet och metallen</i>
Laminatkant	Ledande gummilist (U-profil kring laminatkanten)	10 – 30	<i>Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd</i>
Oslipat och slipat laminat	EMC-tejp	Ingen kontakt	

Tabell 5

Slutsats:

Fabric-over-foam eller laminatkanten direkt mot metallen är de bästa metoderna för att garantera kontakt mellan kolfiberkompositen och metallen. Den goda kontakten mot fabric-over-foam kommer troligtvis från den stora kontaktytan och möjligheten att nå de fibrer som finns på ytan.

Även ledande gummilist ger bra kontakt. Denna ger enkel montering och kräver liten plats och ger ett mer attraktivt utseende. Den ledande gummilisten kan därför vara att föredra. Den försämrade kontakten hos den slipade ytan uppkommer troligtvis då dels icke- eller dåligt elektriskt ledande slipdamm hamnar närmst ytan, samtidigt som laminatets ytan har mycket hög plathalt och de fibrer som bryts inte längre är i kontakt med ytan.



Pre-preg kolfiberlaminat

Kolfiberplatta: 2 lager 650g/m² 2x2 twill [+45°/-45°], pre-preg (120°C, 90 min), $V_f \approx 0,6$, $l = 35$ cm, $b = 12$ cm, en skarv på mitten överlapp 7cm överlapp, baksidan med mönster från avrivningsväv på är den laminatsida som testats mot.

Laminatsida	Skärm-material	Motstånd [Ω]	Kommentar
Laminatkant	Direkt mot metallen	4 – 20	Motståndet beror på vinkeln mellan laminatkanten och metallytan samt kontaktrycket
Laminatkant	FOF	2 – 4	Motståndet varierar svagt med kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd
Oslipat laminat	Koppar-berylliumfingrar	Osäker kontakt	
Slipat laminat	Koppar-berylliumfingrar	6 – 30	Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd
Oslipat laminat	FOF 5x5 mm	Osäker kontakt	
Slipat laminat	FOF 5x5 mm	6 – 30	Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd
Oslipat laminat	FOF 20x4 mm	Osäker kontakt	
Slipat laminat	FOF 20x4 mm	3 – 30	Motståndet beroende på kontaktrycket, högre tryck ger lägre motstånd
Oslipat och slipat laminat	EMC-tejp	Ingen kontakt	

Tabell 6

Slutsats:

Mot pre-preg-laminat får man bäst kontakt mellan laminatkant och en fabric over foam. Dock får man även elektrisk kontakt mot slipat laminat, både mot fabric-over-foam och koppar-berylliumfingrar.

Intressant att notera är den stora skillnaden i resultat mellan oslipat och slipat laminat för det våtlaminerade öppenhärdade laminatet och pre-preglaminatet med avrivningsvävyta. Kontakten mot det oslipade pre-preglaminatet är obefintligt medan den slipade ytan ger bra kontakt medan effekten är precis den motsatta för det våtlaminerade laminatet. Troligtvis beror det på att pre-preglaminatets obehandlade avrivningsvävsvyta består av små toppar av ren epoxi medan den slipade ytan har lika hög kolhalt som längre in i laminatet och därmed även kanten.



8.4.4 Material och produktionsmetoder för foten

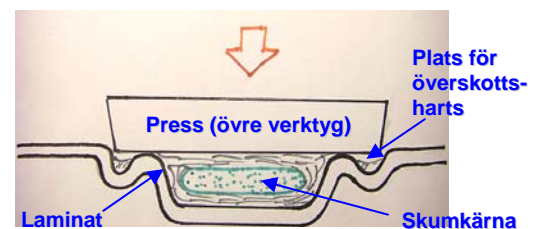
Följande krav som styr val av material och produktionsmetod har ställs på foten utifrån kravspecifikationen (*kapitel 5.1-5,2*):

- Foten måste vara formstabil vid produktion och användning och får inte riskera böjas vid stor belastning då redan en begränsad deformation kan leda till att eye-trackern gungar eller vickar
- Foten bör vara styv i förhållande till vikten och tjockleken
- Produktionsmetoden måste anpassas efter den låga seriestorleken (30-100 st/ år)
- Tillverkningskostnaden får inte överstiga 2000 kr för fot inklusive fotmekanik vilket i praktiken innebär att foten inte får kosta mer än 1000 kr/st vid en seriestorlek om 30 eye-trackers

Utifrån fotens form och de ställda kraven har följande material och produktionsmetoder identifierats och undersökts vidare:

Kolfiberkomposit:

- **Pre-preg med hålrum**
- **Pressning med skumkärna**, se figur 76
- **Massivt laminat** (pressat, RTM eller pre-preg), **vattenskuren**, antingen massiv kolfiber eller kolfiber i ytterlaminaten och glasfiber i kärnan



Figur 76: Principskiss av pressning av kompositfot med kärna, genomskärning av kompositprofilen

Aluminium:

- **CNC-fräst plåt** (eventuellt efter att ha grovskurits med vattenskarving))
- **Vattenskuren plåt**, se figur 77

Kommentarer:

Utöver dessa kompositalternativ finns det fler alternativ, t.ex. RTM med kärna, pre-preg med öppen profil och pålimmad platta. Dessa har dock bedömts som mindre lämpliga än de listade metoderna och för att begränsa urvalet har endast ovanstående kompositmetoder utvärderats.

Vid aluminiumgjutning riskerar detaljer slå sig, varför det inte har ansetts vara en lämplig metod. Metoder som förutsatt svetsning, som sammansvetsning av aluminiumprofiler har uteslutits av kostnadsskäl. Likaså har metoder som förutsätter flera delar förkastats, som där aluminiumprofiler limmas eller pressas samman med plast- eller metallinsatser.

Därtill krävs en höghållfast aluminiumkvalitet (EN 7075 eller EN 2014) för att uppfylla kravet att inte foten skall riskera böjas vid belastning. Dessa höghållfasta legeringar är inte gjutbara, svetsbarheten är högst begränsad likaså möjligheten att *strängpressa* profiler i dessa material [39].



Figur 77: CAD-modell som visar exempel på hur en vattenskuren aluminiumfot (svartlackerad) skulle kunna se ut i uppfällt läge, hål har skurits ut i foten för att ge låg vikt i förhållande till böjstyvheten



Utvärdering och resultat

Kompositalternativen tillåter lägst vikt, speciellt alternativet med skumkärna och det med ihålig kärna. Detta eftersom kolfiberkomposit, speciellt med längsriktade fibrer är mycket styvare än aluminium [1] samtidigt som dessa alternativ är slutna profiler vilket ger betydligt högre vridstyvhet än aluminiumalternativen vilka är öppna profiler.

Samma kompositföretag som utvärderades inför valet av produktionsmetod för bakstycket förfrågades om möjligheten att tillverka fötter till eye-trackern. Det visade sig dock att alla kompositalternativ är för dyra, i praktiken långt över de maximala 1000 kronorna per fot (se *Kravspecifikationen kapitel 5*) [7, 37-38].

Av aluminiumalternativen erbjuder **CNC-fräsning** bäst möjlighet att få fram en fot som uppfyller kraven. Dessutom ges möjlighet att fräsa in spår, dels för att sänka vikten i förhållande till styvheten men även få möjlighet att sänka in fotmekaniken vilket gör att bakstycket kan vara något tunnare.

Detta tillsammans med ett upparbetat samarbete med *LG-produktion*, det företag som fräser framstyckena, gjorde att CNC-fräsning av foten ur aluminiumplåt ansågs vara det bästa alternativet.



8.4.5 Material och produktionsmetoder för kabelavlastaren

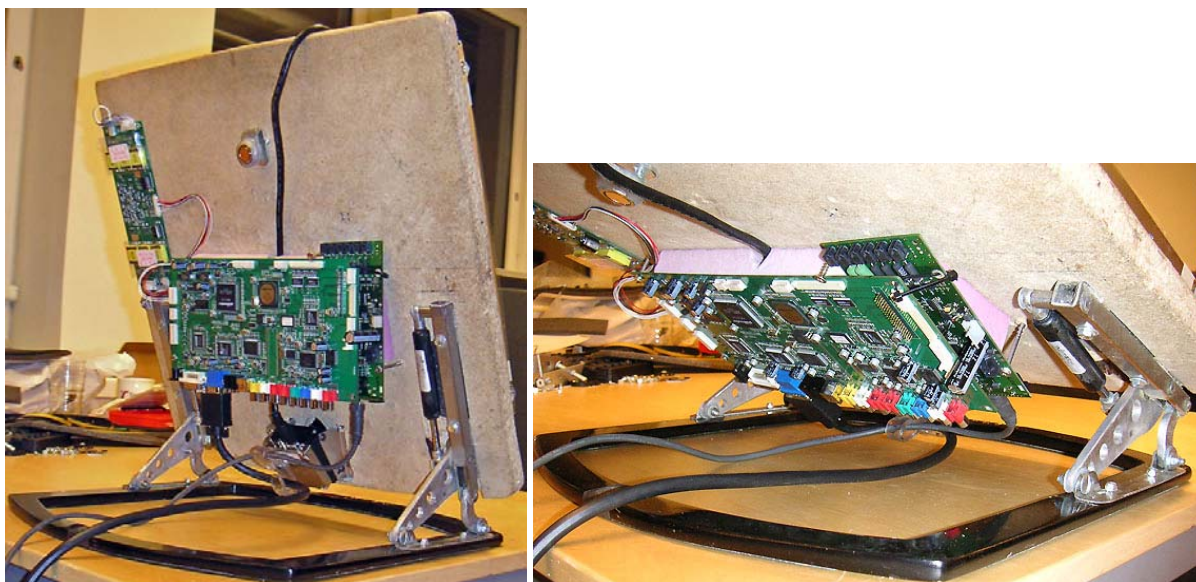
Kabelavlastaren på en monitor har till syfte att samla kablarna och avlasta kontakterna. Funktionen är viktig både ifall olyckan skulle vara framme och man skulle råka rycka i en sladd som utgår från monitorn men även för att leda kablarna rätt då monitorns vinkel i förhållande till bordsytan ändras.

Kabelavlastaren består på monitorer ofta av ett ”kroksystem” av plast som inrymmer kablarna, *se figur 78-80*.



*Figur 78-80: Exempel på kabelavlastare på monitorer
Vänster: Dell, Mitt: Dell, Höger: Samsung*

Från eye-trackern utgår fem till sju kablar inkopplade till kretskorten som måste avlastas. Eye-trackern har mycket stor vinkeländringsmöjlighet i förhållande till en vanlig monitor. Därför krävs en kabelavlastare med fjädrande armar som kan klämma fast kablarna. Lämplig placering är på bakstyckets kamerapuckel (*se figur 81 och 82*). Kablarna leds i kors för bästa funktion.



Figur 81,82: Testuppställning, test av utformning och placering av kabelavlastare och kablarnas gång vid olika lutning av eye-trackern



En attraktiv lösning framtagen i samråd med en industridesigner [20] hade varit att inkludera kabelavlastaren direkt i bakstycket utan några externa detaljer, *se figur 83 och 84*. Detta genom att vattenskära ett spår och utnyttja kolfiberkompositens elastiska förmåga för att klämma fast kablarna. Tyvärr visade sig denna lösning inte vara praktisk.



Figur 83, 84: Två alternativ (inringade) för kabelavlastare direkt i bakstycket genom vattenskurna spår

I stället har en kabelavlastare baserad på fjädrande ”fingrar” utvecklats. För att åstadkomma denna kabelavlastare med fjädrande fingrar som kan inkluderas i bakstyckets design och som är lämplig vid små serier har följande material- och tillverkningsalternativ identifierats:

- **Kolfiberkomposit, längsgående profil som lamineras och vattenskärs**
- **Polykarbonat, CNC-fräses (2-axligt) och kallbockas**

Utvärdering och resultat

Polykarbonat är en transparent ofärgad termoplast som är mycket slagtålig, och i viss omfattning liknar fjäderstål. Materialet fjädrar och kan kallbockas. Kostnaden är relativt låg, både för materialet och för produktionsprocessen. Eftersom materialet är transparent integreras en kabelavlastare väl i bakstycket utan att störa utseendet. Materialskillnaden i förhållandet till bakstycket gör att användaren bör inse vad en kabelavlastare av polykarbonat är till för, varvid kabelavlastarens funktion blir självförklarande, vilket är eftersträvningsvärt.

Kontakt med lämplig legotillverkare för kabelavlastare i polykarbonat, *Packningar & Plast*, hade Tobii sedan tidigare, för fräsning av IR-filterna. Dessa har CNC-fräsutrustning med vakuumbord lämplig för fräsning av polykarbonatskivor, samtidigt som de tillhandahåller materialet och kan sköta bockningen via en av deras legotillverkare. Dessa skäl tillsammans med ekonomiska motiv är den främsta orsaken till att **polykarbonat har ansetts vara det bästa materialvalet för kabelavlastaren.**



8.5 Dimensionering

Dimensioneringen av eye-trackerns delar ingick i konstruktionsfasen. Detta främst för att optimera vikten och minimera materialåtgången och därmed minska tillverkningskostnaderna. Teoretiska dimensioneringsberäkningar har dock i praktiken inte direkt styrt val godstjocklekar utan snarare utnyttjats som en fingervisning varefter aktuella godstjocklekar istället har bestämts efter vad som varit praktiskt möjligt och/eller vad som har visat sig rätt vid praktiska prov.

8.5.1 Dimensionering av bakstycket

Nedanstående redovisning är förenklade beräkningar av styvheten hos ett laminat som motsvarar det som använts till bakstycket med målsättning att få reda på hur tjockt laminatet behöver vara för att motsvara styvheten hos 1,5 millimeter stålplåt (se *Skallkrav, kapitel 5.1*) och hur många lager väv detta motsvarar.

Indata:

Jämförelsematerial, stålplåt:

Tjocklek: $T_{fe} = 1,5 \text{ mm}$

E-modul: $E_{fe} = 213 \text{ GPa}$ [6]

Kompositmaterial, Pre-preg:

Fiber: HS-kolfiber

Fiberutformning: Väv med fiberriktningen $[0^\circ/90^\circ]$, 50% i varje riktning: $\beta_f = 0,5$ [11]

E-modul kolfiber: $E_f = 230 \text{ GPa}$ [5]

Volymfraktion fiber: $V_f = 0,6$

Matris: Värmehärdande epoxi

E-modul matris: $E_m = 3 \text{ GPa}$ [11]

Volymfraktion matris: $V_m = 0,4$

Beräkning av laminattjockleken

E-modulen för laminatet:

$$E_l = E_f * V_f * \beta_f \Rightarrow E_l = 230 \text{ [GPa]} * 0,6 * 0,5 \Rightarrow E_l = 69 \text{ [GPa]} \text{ [11]}$$

Erforderlig laminattjocklek (T_l) förutsatt att böjstyvheten ökar med T^3 :

$$E_{fe} * T_{fe}^3 = E_l * T_l^3 \Rightarrow 213 \text{ [GPa]} * 1,5^3 \text{ [mm]} = 69 * T_l^3 \text{ [mm]} \Rightarrow T_l \approx 2,2 \text{ [mm]}$$

Resultat:

För att kolfiberlaminatet i bakstycket skall ha samma böjstyvhet som motsvarande 1,5 millimeter stålplåt skall **laminattjockleken vara 2,2 millimeter**.

För att göra beräkningarna enkla att följa har följande förenklingar har tillåtits:

- Styvheten hos laminatet har beräknats i någon av laminatets huvudfiberriktningar
- Matris materialet (epoxin som binder samman laminatet) anses inte bidra med någon styvhet eftersom E-modulen för fibern vida överstiger styvheten för matris materialet, dvs. $E_f \gg E_m$



Beräkning av antal lager väv

Den väv som finns bäst tillgänglighet av och som är mest kostnadseffektiv har en vikt av 650 gram per kvadratmeter, därför bör denna väljas.

Indata:

Ytvikt väv = 650g/m²

Densitet fiber (HS-kolfiber): $\rho_f = 1800 \text{ kg/m}^3$ [5]

Densitet matris (epoxi): $\rho_m = 1100 \text{ kg/m}^3$ [11]

Detta ger densiteten för laminatet:

$$\rho_l = \rho_f * V_f + \rho_m * V_m \Rightarrow \rho_l = 1800 [\text{kg/m}^3] * 0,6 + 1100 [\text{kg/m}^3] * 0,4 \Rightarrow \rho_l = 1520 [\text{kg/m}^3] \text{ [11]}$$

Viktfraktionen fiber för laminatet:

$$W_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m} \Rightarrow W_f = \frac{0,6 * 1800 [\text{kg/m}^3]}{0,6 * 1800 [\text{kg/m}^3] + 0,4 * 1100 [\text{kg/m}^3]} \Rightarrow W_f \approx 0,71 \text{ [11]}$$

Med ytvikten fiber 650 g/m² = 0,65 kg/m² blir totalvikten laminatet per lager:

$$0,65 [\text{kg/m}^2] / 0,71 \approx 0,915 [\text{kg/m}^2]$$

Detta ger laminattjockleken:

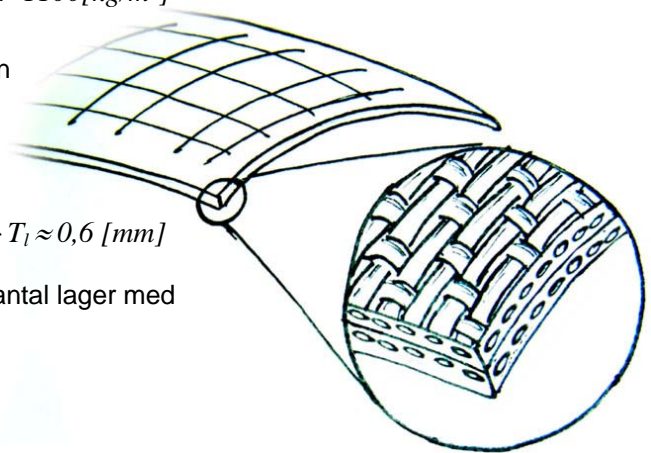
$$T_l = 0,915 [\text{kg/m}^2] / 1520 [\text{kg/m}^3] \Rightarrow T_l \approx 6 * 10^{-4} [\text{m}] \Rightarrow T_l \approx 0,6 [\text{mm}]$$

Med en erforderlig laminattjocklek (2,2 mm) krävs då antal lager med 650 g/m²-väv:

$$2,2 [\text{mm}] / 0,6 [\text{mm}] = 3,67 \text{ lager} \Rightarrow 4 \text{ lager}$$

Resultat:

För att laminatet i bakstycket skall ha samma böjstyvhet som motsvarande 1,5 millimeter stålplåt krävs **4 lager med 650 g/m² kolfiberväv**



Figur 85: Principskiss över laminat baserad på två lager 2x2-twillväv

Kommentar till dimensioneringen:

Bakstycket är utformat med många krökta ytor och veck vilket ger en avsevärt högre styvhet i förhållande till motsvarande plana stålplåt. Detta tillsammans med praktiska prov har gjort att en laminattjocklek långt under beräknade de 2,2 millimeter bedömts räcka. I praktiken är därför bakstycket uppbyggt med två lager 650g/m²-kolfiberväv (se figur 85) med en laminattjocklek på 1,2 millimeter (se Slutgiltig konstruktion, kapitel 9.1).

8.5.2 Dimensionering av framstycket

Framstycket är inte dimensionerat genom beräkningar. Istället har minsta generell godstjocklek på två millimeter valts. Detta för att framstycket från början konstruerades för att kunna gipsgutas. Vid tunnare godstjocklek riskerar hål uppstå vid gipsgjutning [21]. Hade framstycket från början utformats för CNC-fräsning hade en generell godstjocklek på 1,5 mm kunnat väljas. Denna bedömning har gjorts efter att ha utvärderat det frästa framstycket.



8.6 Prototypframtagning

Under prototypfasen togs prototyper för eye-trackerns delar fram. Detta för att både utveckla och utvärdera den mekaniska funktionen och utseendet.

8.6.1 Prototypframtagning av bakstycket

Prototypen till bakstycket togs fram i flera steg. Först byggdes det upp en plugg i extruderad polystyren (XPS av märket Jackofoam). Plattorna skars med värmetråd (se figur 86) i flera delar som sattes samman med matt-tejp. Under uppbyggnaden testades bakstycket med prototyper av foten och fotmekaniken, se figur 87.



Figur 86, 87: XPS-plugg för prototypbakstycke under uppbyggnad
Vänster: Värmetrådsskärning
Höger: Pluggen testas med prototypfot och fotmekanik

Polystyrenpluggen laminerades med ytmatta och epoxi och spacklades därefter med lättslipad epoxibaserat mikrobalongspackel, se figur 88. Pluggen sandpapprades till god ytfinish och limmades mot en masonitplatta. Slutligen penslades pluggen med ren lamineringsepoxi för att täta mikrobalongernas porer och masonitplattans yta. Pluggen vaxades och släppmedelbehandlades varefter en negativ form laminerades mot pluggen. Först epoxigelcoat (lamineringsepoxi med tixtropspulverinblandning) som tilläts gela innan epoxi-glasfiber-laminatet lades på, se figur 89.



Figur 88, 89: XPS-plugg och form under uppbyggnad
Vänster: XPS-plugg spacklad med epoxibaserat mikrobalongspackel, grovt slipad
Höger: Glasfiber-epoxiformen laminerad över XPS-pluggen. Masonitplattan som limmats mot pluggen utnyttjas som mothåll då den negativa formen avlägsnas, och vidare då laminerade prototypbakstycken avlägsnas från formen.



Utifrån formen som hade tagits fram laminerades ett prototypbakstycke i epoxi armerad med kolfiberväv. Denna utvärderades tillsammans med ett prototypframstycke framtagen på samma sätt (*se kapitel 8.6.2*), en prototypfot (*se kapitel 8.6.3*) och fotmekanik (*se kapitel 8.6.4*). Därmed kunde eye-trackerns form och funktion utvärderas. Trots att prototypchassiet hade byggts upp med CAD-modellen som mall utifrån utskrivna vyer ansågs chassiet avvika för mycket från CAD-modellen, med sämre precision gentemot komponenterna internt och ett övergripande sämre formspråk pga. bristen på precision. Därför beslutades det att gå vidare till en prototyp gjord direkt utifrån CAD-modellen via pluggar framställda genom *friformframställning (FFF)*.

Friformframställning innebär att man kan "skriva ut" en riktig tredimensionell modell direkt från en CAD-modell. **FFF** utnyttjas för att snabbt visualisera eller funktionstesta konstruktioner eller delkonstruktioner innan den riktiga konstruktionen tas fram [7]. Genom FFF kan man även ta fram pluggar eller formar för att antingen direkt eller via en mellanform gjuta eller laminera prototyper eller riktiga konstruktioner. Det finns många olika FFF-metoder, baserad olika typer av material, termoplast, hårdplast, mineralpulver eller metall, som alla har både för- och nackdelar.

Den FFF-metod som utnyttjades för att framställa pluggen till bakstycket kallas av tillverkaren Z Corporation "3D-printing". Denna baseras på gipspulver (*se figur 91*) bunden med en sockerlösning [2], vilket ger porösa och känsliga men mått- och värmestabila detaljer. Denna metod är billig och snabb i förhållande till andra FFF-metoder men kräver impregnering av ett starkare bindemedel för att bli tillräckligt stark för att kunna hanteras. De mekaniska egenskaperna hos detaljerna bestäms av vilket material som utnyttjas vid impregneringen, epoxi, *cyanoakrylat*, *polyuretan* eller vaxlösning [2].

Framställningen gjordes hos företaget *Solid Makarna* i deras FFF-maskin, Spectrum Z510, *se figur 90*.



Figur 90, 91:

Vänster: FFF-maskin. Spectrum Z510 hos Solidmakarna

Höger: Bakstyckesplugg innan det har plockats ur pulverbadet i FFF-maskinen



Pluggen delades upp i fyra delar (se figur 92) anpassade till FFF-maskinens begränsade utskriftsområde 254 x 356 x 203 millimeter (längd x bredd x höjd) [2].



Figur 92: FFF-plugg till bakstycket i de fyra delar som framställdes innan impregnering, sedda från insidan

Pluggdelarna impregnerades med rumstemperaturhärdande lamineringsepxi, NM 275. Epoxin färgades svart med kimrök för att underlätta att se när gipsgodset var genomvätt.



Figur 93, 94: FFF-plugg till bakstycket, innan impregnering (vänster) och efter impregnering inför sammanskruvning och limning (höger)



Efter impregnering och härdning sammanfogades delarna, skruvades och limmades samman varefter pluggen vattenslipades (se figur 95), lackades med polyuretanlack, vattenslipades igen och polerades och vaxades till tillräcklig finish hade erhållits (se figur 96).



Figur 95: Våtslipning av FFF-pluggen till bakstycket



Figur 96, 97: FFF-plugg till bakstycket utsida (vänster) och insida (höger) efter impregnering, sammanlimning, slipning och polering

Utifrån pluggen laminades en form i epoxi och glasfiberväv, med epoxigelcoat närmst pluggen, se figur 98. Formen utnyttjades för att laminera flera bakstycken (se figur 99).



Figur 98, 99:
Vänster: Form till prototypbakstycket utifrån FFF-plugg
Höger: Laminering av prototypbakstycke



Olika varianter av bakstycken laminerades, med olika ytskikt (utan gelcoat, med ofärgad gelcoat och svart gelcoat) och olika kolfiberväv (200 g/m² och 650 g/m² ytvikt), se figur 100.



Figur 100: Tre prototypbakstycken efter vattenskärning av ventillationshål och urtagen till fotmekaniken

Detta för att utvärdera olika utseende och godstjocklek samt efterbearbetningsmetoder (främst vattenskärning), för att ha demonstrationsbakstycken till legotillverkare (kompositföretag, vattenskärare och väsktillverkare) och för att kunna bygga upp totalt tre eye-tracker-prototyper för utvärdering och demonstration, se figur 101 och 102.



Figur 101, 102: Prototypbakstycke (med svart gelcoat), vattenskuren med nät monterat

Vänster: Delvis hopbyggd, utan fot, kretskort och kabelavlastare

Höger: Komplet prototyp-eye-tracker sedd snett framifrån, bakom syns även delar av fler prototypbakstycken och ett prototypframstycke



8.6.2 Prototypframtagning av framstycket

En plugg i extruderad polystyren (XPS) byggdes upp på samma sätt som bakstyckespluggen, *se kapitel 8.6.1*. Pluggen spacklades med epoxibaserat mikrobalongspackel (*se figur 103*) och limmades mot en masonitplatta (*se figur 104*).



Figur 103, 104: XPS-plugg av framstycket under uppbyggnad

Utifrån pluggen lamineras en negativ form (*se figur 105*) i vilken ett prototypframstycke lamineras i kolfiberkomposit (*se figur 106*).



Figur 105, 106:

Vänster: Våtlaminerad glasfiber-epoxi-form utifrån XPS-pluggen av framstycket

Höger: Prototypframstycke med skärmelement (med skyddsplast), IR-filter och knappfilter monterade

En komplett eye-tracker-prototyp byggdes upp tillsammans med ett prototypbakstycke (även detta framställt via en XPS-plugg) en prototypfot, fotmekanik och eye-trackerns elektroniska komponenter.

Precisionen och finishen på prototypdelarna uppbyggda via skumplastpluggar ansågs dock otillräcklig. Därför byggdes en framstyckesplugg upp via friformsframställning (*se figur 107 och 108*) enligt samma metod som för bakstycket, *se kapitel 8.6.1*.



Figur 107, 108:

Vänster: Insidan av FFF-pluggen till framstycket innan impregnering, detaljer som LED-infästning och skruvtorn som fanns i CAD-modellen har lämnats kvar och "skrivits ut"

Höger: Impregnering med lamineringsepxi av en fjärdel av FFF-pluggen till framstycket



För framstycket ansågs det lämpligt att ta fram formen i gjutpolyuretan (Ureol), Rencast FC 52 (se figur 110), ett snabbhärdande, hårt gjutpolyuretansystem [41] som saluförs av ABIC Kemi. Formar uppbyggda på detta sätt är både lämpliga för kompositlamining men även för gipsgjutning (se kapitel 8.4.2.2). Ett kärl kring framstyckespluggen byggdes upp av stålplåtar som provisoriskt sattes samman av smältlim och tejp, se figur 109.



Figur 109, 110:

Vänster: Plugg med plåtkanter för gjutning av form i gjutpolyuretan (Ureol) till framstycket

Höger: Gjutpolyuretan (Ureol) Rencast FC 52, utnyttjad för att ta fram form till prototypframstycket

Polyuretanformen utnyttjades för att ta fram ett prototypframstycke i kolfiberkomposit, se figur 112. Detta efterbearbetades med handverktyg, sticksåg, minifräs, bormaskin och fil för att ta avlägsna kanter och ta fram hål till eye-trackingkomponenterna och högtalarna, se figur 111.



Figur 111, 112.

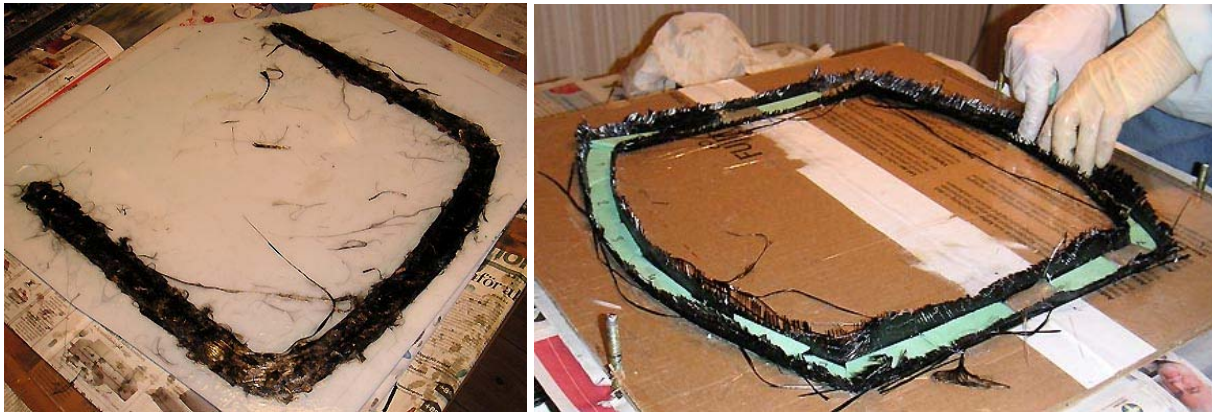
Vänster: Tillverkning av prototypframstycke, hål för kameran, IR-belysarna, knapparna och högtalarna togs ut med hjälp av en minifräs (Dremmel)

Höger: Prototypframstycket (innan lackering) med skärmelement (med skyddsplast), IR-filter och knappfilter monterat



8.6.3 Prototypframtagning av foten

Till foten gjordes olika varianter på prototyper i kolfiberarmerad epoxi, våtlaminerad och pressad med enkla verktyg. För att testa funktionen och utseendet gjordes både öppna och slutna profiler och både massivt laminat (se figur 113) och med cellplastkärna (Divinycell H60) (se figur 114).



Figur 113, 114: Prototyper till foten

Vänster: Laminering av fot med öppen profil och massivt riktat kolfiberlaminat

Höger: Laminering av kolfiberfot med slutna profil och med divinycellkärna

I samband med att friformsframställda pluggar togs fram till fram- och bakstycket friformsframställdes även en plugg till en kompositprototypfot. Kring fotpluggen byggdes ett kärl i masonit med kärnfogspacklade kanter (med lamineringsepxi förtjockad med *limpulver*), se figur 115. Pluggen impregnerades och masonitkärlet tätades med lamineringsepxi. Efter att ha vaxats och släppmedelsbehandlats gjöts en form i masonitkärlet genom att hålla i snabbhärdande gjutpolyuretan av samma typ som användes för att framställa prototypformen till framstycket, se figur 110.



Figur 115, 116: Framtagning av prototyp till foten

Vänster: Friformsframställd fot kring vilket en behållare har byggts upp i masonit och epoxi

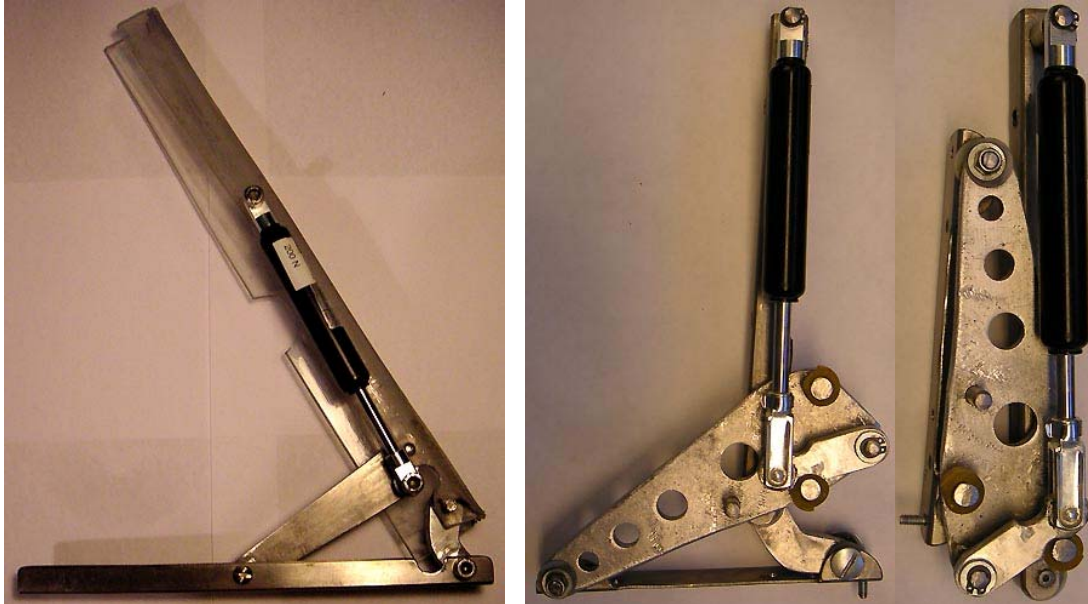
Höger: Gjutning av polyuretan (Ureol), en lågviskös snabbhärdande gjutplast som liknar ostmassa

Polyuretanformen till foten användes för att ta fram en prototypfot i kolfiberkomposit med riktade fibrer och med cellkärna (Divinycell H60) enligt en förenklad variant av pressmetoden (se figur 76).



8.6.4 Prototypframtagning av fotmekaniken

Under utvecklingsarbetet av fotmekaniken togs prototyper fram i olika steg (*se figurer 36-45 under Konstruktionskapitlet 8.3.1*), från rena testdelar gjorda i kartong och kretskortmaterial till mekaniskt fungerande prototyper i aluminium och stål tillsammans med olika motbelastande gasfjädrar, *se figur 117 och 119*.



Figur 117 - 119: Prototyper till fotmekaniken

Vänster: utan "snäppfunktion"

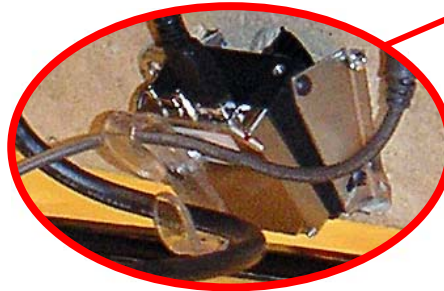
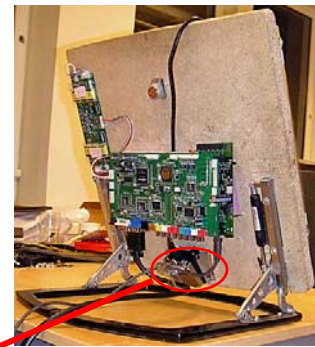
Mitten och höger: med "snäppfunktion", där fotmekaniken intar två tillstånd ett då foten är utfälld där eye-trackerns vikt balanseras med gasfjädern (bild mitten) och ett få foten är uppfälld där gasfjädern pressar för att bibehålla detta läge (höger bild)

Produktifieringen av fotmekaniken skedde genom att tre uppsättningar prototypfotmekanik togs fram av företaget *Plåt & Mekano (P&M)* och dess legotillverkare. Detta skedde utifrån CAD-modeller (likvärdiga med de sista egentillverkade prototyperna) och efter diskussion med [25] kring produktionsvänliga lösningar för mekanikens ingående delar och sammanfogningarna mellan delarna. Denna prototypserie visade sig fungera bra varvid endast mindre förändringar gjordes från denna prototypserie till *nollserien* (förserien) om 30 stycken.

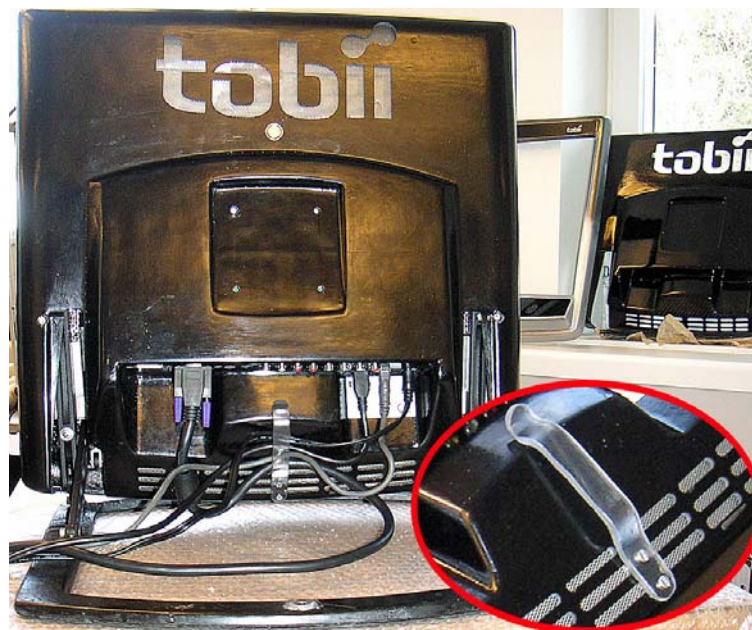


8.6.5 Prototypframtagning av kabelavlastaren

Under utvecklingsarbetet togs olika varianter av kabelavlastare fram (se figur 120 och 121) för att komma fram till den optimala utformningen i fråga om både funktion och utseende. Främst utnyttjades polykarbonat, eftersom detta material visade sig lämpligast för kabelavlastaren vid produktion samtidigt som det lämpade sig väl för flexibel prototypframtagning då det är lättarbetat, går kallbocka och forma i princip fritt efter att ha värmts upp med varmluftpistol eller i ugn.



Figur 120: Prototyp av kabelavlastare i varmbockad polykarbonat baserat på ett dubbelt kroksystem monterad på baksidan av kameran på en testuppsättning av eye-trackern



Figur 121: Prototyp med enkelarmad fjädrande kabelavlastare i varmbockad polykarbonat, ner till höger syns detaljförstoring utan kablar. Prototypen på bilden har prototypbakstycke, våtlaminerad med svart gelcoat, prototypfot i kolfiberkomposit med cellplastkärna och fotmekanik från prototypserien, till höger på bilden syns även ett prototypframstycke och ytterligare ett prototypbakstycke



9 Slutgiltig konstruktion

Under detta kapitel beskrivs den slutgiltiga konstruktionen av eye-trackern Tobii 2150C och dess ingående delar inför produktion efter att en nollserie (förserie) hade tagits fram.

Följande delar av eye-trackern kommer att beskrivas avseende material, produktionsmetod, tillverkare, efterbearbetning, dimensionering och vikt (*siffrorna refererar till figurerna nedan, se figur 122, 123*):

- ① Bakstycke
- ② Framstycke
- ③ Fot
- ④ Fotmekanik
- ⑤ Kabelavlastare
- ⑥ Komponentupphängning
(syns ej i figuren)



Figur 122, 123: Slutgiltig konstruktion av Tobii 2150C, nollserieexemplar med olackat bakstycke och fot, sedd snett framifrån och snett bakifrån



9.1 Slutgiltig konstruktion - ❶ Bakstycket

Material: Kolfiberkomposit
Fiber: kolfiber, HS-kvalitet
Matris: värmehärdande epoxi

Produktionsmetod: Pre-preg, autoklav 140°C i 90 minuter [7]

Tillverkare: Marström Composite

Efterbearbetning: Vattenskarning, lackering (2 lager), slipning

Dimensionering: 2 lager 650g/m² 2x2-twill ⇒ T = 1,2 mm

Vikt: 700 gram (inkl metallfilter och fästdon)



Figur 124, 125: Utsida och insida av lackat bakstycke med metallnät och kabelavlastare monterade

9.1.1 Detaljer för bakstycket

Bakstycket är utformat med relativt snävt tilltagna radier, en eftergift för att inte designen skall uppfattas som allt för "luddig" [20]. Detta ställer krav på produktionsmetoden och möjligheten att pressa ut kolfiberväven. Vid bakning i autoklav (se figur 60) pressas väven ut under högt tryck (ca 8 bar) [8] vilket möjliggör dessa begränsade radier.

Släppvinklarna på bakstycket är däremot relativt väl tilltagna.

Ventilationen genom eye-trackern sker genom luftintaget nertill i form av en "grill" (se figur 131) och upp till i form av Tobii:s logotyp. Genom att luften värms upp av komponenterna och stiger sker ett naturligt kylande luftflöde.

Bakom ventilationshålen sitter ett finmaskigt galler av rostfri expandermetall (från företaget *Expandermetall*). Denna fungerar både som elektromagnetisk skärmning [15], som petskydd och för att skydda mot insyn mot eye-trackerns innandöme och dess komponenter. För att stödja nätet under logotypen sitter en aluminiumplåt. Nätet och plåten vattenskärs.



VESA-fästet i bakstycket bildar en försänkt ficka (se figur 126). Gångorna för fästskruvarna (4st M4) är i form av trycktäta blindmuttrar, dvs. blindmuttrar med ändstopp. Detta eftersom för långa skruvar till VESA-fästet annars kan förstöra kretskortet som är placerat bakom. Blindmuttrarna är i syrafast rostfritt stål för att minimera risken för galvanisk korrosion mot kolfibern.



Figur 126: VESA-fästet från insidan.

Volymökningsmöjlighet

Nuvarande produktionsmetod, pre-preg med härdning i autoklav är en process som kräver många manuella moment vid både tillverkningen och efterbearbetningen. Därtill är den totala processtiden lång. Detta innebär att metoden är olämplig för stora serier och möjligheten att sänka kostnaderna är begränsade. Vid seriestorlekar inom området 300 bakstycken eller mer bör därför en annan produktionsmetod väljas. Den produktionsmetod för att framställa kolfiberkompositbakstycken med kontinuerliga fibrer som är möjligt att automatisera längst och som samtidigt har kortaste processtiden är RTM [11, 36]. Därför bör denna metod väljas vid större serier. Den höga verktygskostnaden utslagen över många bakstycken blir begränsad samtidigt som fördelarna väger över. Därtill bör vara möjligt att sänka styckekostnaden i större omfattning än för andra mer manuella produktionsmetoder, långt under de kostnadsuppgifter som *Carbonia* har gett vid låga seriestorlekar.

Finns det önskemål att sänka kostnaderna på bekostnad av vikt, styvhet, finish och kvalitetskänsla bör man överväga att gå över till en lösning för bakstycket i oarmerad *termoplast*, *ABS* eller polykarbonat. Med den nuvarande utformningen och utan större modifikationer bör *varmformning* (se figur 127) vara det bästa alternativet. För att uppnå minimala radier och exakt önskad form och mått på utsidan bör varmformningen ske mot en negativ form, dvs. med utsidan mot formen.

Styckekostnaden sjunker då till omkring 1000 kr/st inklusive beläggning av ledande skikt (vilket krävs för att åstadkomma skärmning) och efterbearbetning (CNC-fräsning) enligt kostnadsuppgifter från olika legotillverkare i Sverige.

Processtiden är kort och det är möjligt att i hög grad automatisera processen vid varmformning varför det bör vara en lämplig metod även vid mycket stora serier.



Figur 127: Exempel på varmformade detaljer i ABS-plast

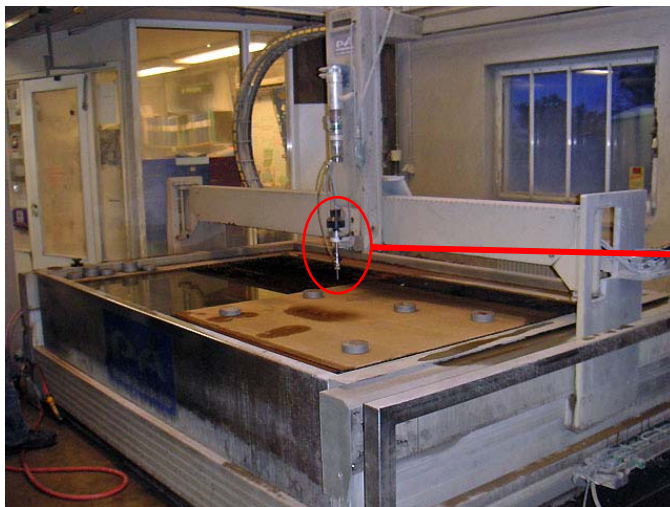


9.1.1.1 Vattenskärning

Information sammanställd efter presentation av och diskussion med [23] samt diskussion med [28] och [29] med kompletterande information från [3]:

Den främsta bearbetningsmetoden som utnyttjas för bakstyckena är *vattenskärning*. Samtliga uttag och hål vattenskärs hos legoföretaget *PÅ-Vattenskärning*.

Vattenskärning är en bearbetningsmetod där man skär med hjälp av vatten som under högt tryck (kring 4000 bar) pressas samman till en tunn stråle (kring en millimeter) som skjuts ut ur ett hårdmetallmunstycke (*se figur 128*) med mycket hög hastighet. Energitätheten hos strålen är så hög att den sönderdelar alla material under dess väg från munstycket ner till bassängen i vattenskärmaskinen.



Figur 128: Vattenskärningsmaskin hos PÅ-Vattenskärning, inringad till höger är skärhuvudet där vattnet och abrasivmedlet (slipmedlet) blandas för att sprutas ut ur hårdmetallmunstycket

Skärningen kan både ske med rent vatten eller med tillsats av slipmedel, s.k. *abrasiv* skärning. Skärning i hårdare material som kolfiberkomposit sker normalt abrasivt.

Materialet som skärs utsätts inte för någon upphettning (vilket annars är fallet vid både mekaniska bearbetningsmetoder och laserskärning), inte heller för några större belastningar vilket ställer låga krav vid uppspanningen.

Alla material som tål vatten kan skäras, allt från mjuka material som skumgummi till hårda metaller och fiberkomposit. I hårda material är normalt maximal skärtjocklek 100 – 200 millimeter.

Vattenskärningsmaskiner är normalt 2-axliga eller 3-axliga, fler axlar är mycket ovanligt. Varken arbetstycket eller skärmunstycket kan alltså vridas utan skärningen sker endast i ett plan med omspanning mellan.

Bakstyckena är vattenskurna i tre plan:

1. **Logotypen och uttag för fotmekaniken och skruvhålen**
2. **Luftintaget nertill**
3. **Kontaktuttagen**



Figur 129: Masonitskiva som använts som underlag vid vattenskärningen av bakstycket, vid planet för logotypen och uttag för fotmekaniken

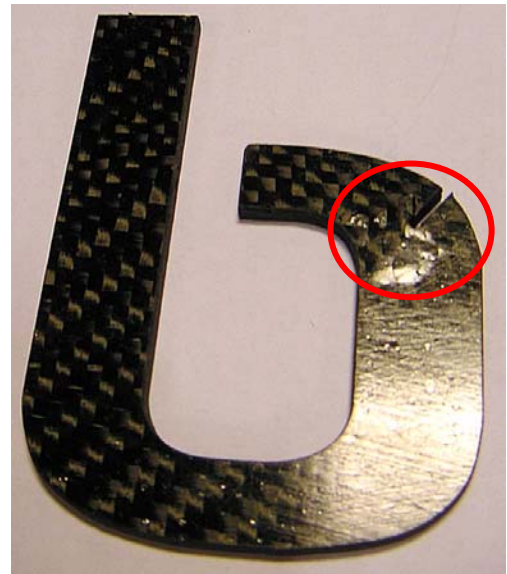


Vattenskärning av kolfiberkomposit har flera fördelar i förhållande till traditionell mekaniskt bearbetande metoder som fräsning och sågning:

- **Begränsat verktygsslitage** (fiberkompositen sliter normalt hårt på fräsar och liknande mekaniskt bearbetande verktyg).
- **Inget damm** (kolfiberdamm som kan spridas vid traditionell bearbetning är ledande och sprider sig i luften och kan kortsluta elektroniken i fleroperationsmaskiner).
- **Fina figursågade snitt** med nästan **obegränsad utformning**.

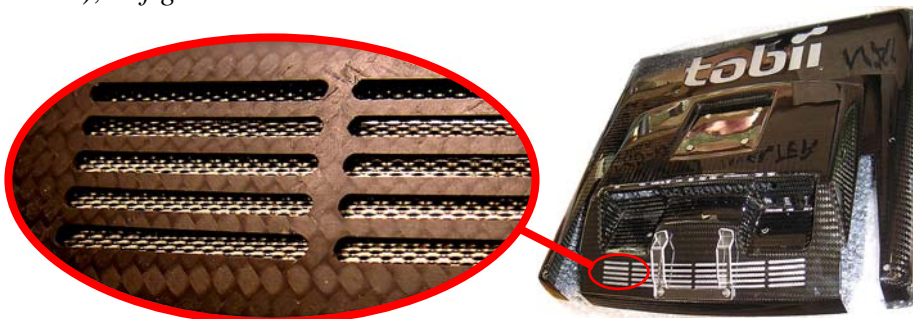
Det ställs dock ett antal krav vid vattenskärning av fiberkomposit:

- **Minimal mängd luftinneslutningar** i laminatet för att minimera risken för mikroprängningar av laminatet.
- Om möjligt en **startsträcka** på minst 5 millimeter för att undvika risken för mikroprängningar som kan uppstå då vattenstrålen först skjuter genom laminatet, detta gäller speciellt om laminatet innehåller luftinneslutningar (se figur 130).
- **Ingenting under det laminat som skall skäras** eftersom vattenstrålen skär igenom allt i sin väg ner till vattenbassängen, det är ej möjligt att skära bara ett lager och skydda lagret under.



Figur 130: Vattenutskuren del ("b" i logotypen) från ett av prototypframstyckena, våtlaminerat med hög mängd luftinneslutningar, inringat syns där vattenstrålen har startat, startsträckan till den egentliga skärningen och en mikroprängning

Bakstycket i autoklavbakad pre-preg har hög laminatkvalitet och minimal mängd luftinneslutningar. Risken för de mikroprängningar som kan uppstå då vattenstrålen träffar en luftinneslutning vid start eller under skärningen är därför mycket liten. Därför har det varit möjligt att skära utan startsträcka och göra små snitt, vilket både gäller skruvhålen (5 millimeter i diameter) och ventillationsgallret nertill (3 millimeters bredd), se figur 131.



Figur 131: Detaljförstoring av det vattenskurna ventillationsgallret med endast 3 millimeter breda skåror



9.2 Slutgiltig konstruktion - ② Framstycket

Material: Aluminium, EN 6061-T6 eller EN 6082-T6

Produktionsmetod: CNC-fräsning, ramen: 3 axlig, nederdelen: 5-axlig

Tillverkare: LG-produktion

Efterbearbetning: Blästring, pulverlackering

Dimensionering: T = 2mm (generell godstjocklek)

Vikt: 1100 gram

Framstycket (se figur 132 och 133) består av två delar, en ram som fräst 3-axligt och en nederdel som är fräst 5-axligt, se figur 134.

Delarna skruvas samman innan pulverlackeringen av framstycket. Skarven mellan delarna döljs naturligt vid övergången från ramen till nederdelen och fylls delvis av pulverlacken varvid skarven knappt syns utan framstycket uppfattas som en enhet.



Figur 132, 133. Framstycke blästrat och olackerat, vänster: utsida, höger: insida



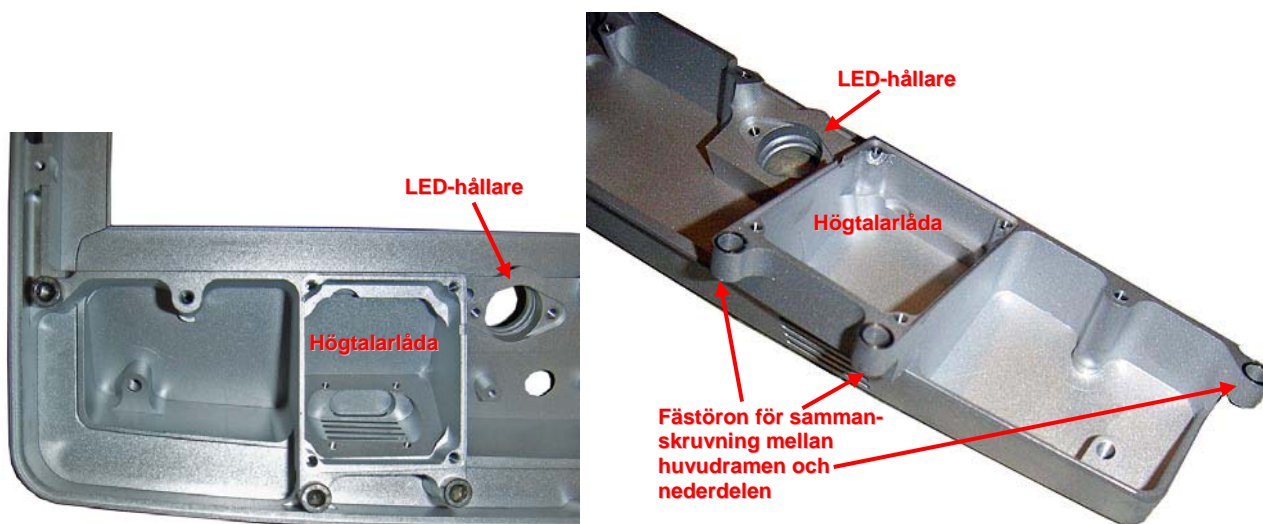
Figur 134. Nederdelen till framstycket, sedd utifrån, blästrat och olackerat. Denna del är 5-axligt fräst och skruvas mot framstyckets ram innan pulverlackering



Orsaken till att fram stycket är uppdelad i två delar istället för att bestå av endast en del har tre orsaker:

1. **Möjlighet att utnyttja befintlig utrustning hos LG-produktion.** De 5-axliga fräsarna klarar inte detaljer som är så stora som hela framstycket, däremot finns det stora 3-axliga fräsar som klarar ramen. Av samma orsak underlättas även ett eventuellt byte av legotillverkare.
2. **Mindre materialåtgång.** Hade hela framstycket frästs ur ett stycke hade ca 40 procent mer utgångsmaterial krävts [10].
3. **Högre flexibilitet.** Genom att enbart ändra på utformningen av nederdelen, vinkeln i förhållande till bildskärmen, kan eye-trackern anpassas till andra användaravstånd och därmed andra användningsområden, eller vid en eventuell optimering. Vid en uppgradering till ett system med en annan sensor (kamera), flera sensorer och/eller andra ljuskällor bör endast nederdelen behöva ändras (eventuellt tillsammans med bakstycket).

Integrerat i framstycket är fästen för alla eye-trackerns komponenter, direkt eller via plåtar (se kapitel 9.6). Genom att integrera LED-hållarna nertill (se figur 135 och 136) har avståndet till skärmytan kunnat minimeras vilket minskar risken för problem vid eye-tracking då personen som ögonstyr eller ögonspåras tittar högt upp på skärmytan [9].



Figur 135, 136: Detaljförstorningar av framstyckets insida, högtalarlådorna och LED-fästena
Vänster: Huvudramen (3-axligt fräst) och nederdelen (5-axligt fräst) sammanskruvade
Höger: Nederdelen innan den skruvats fast mot ramdelen

Volymökningsmöjlighet

Vald produktionsmetod, CNC-fräsning tillåter höga volymer. Legotillverkaren som fräser framstyckena, fräser t.ex. chassien som liknar tillverkaren *JLT Mobile Computers* [40]. Det chassi som har högst tillverkningsvolym framställs i 8000 exemplar per år [10]. För att tillåta stora volymer och sänka kostnaden bör dock utformningen av framstycket optimeras utifrån den fräs som används för att på detta sätt förkorta processtiden och maskinkostnaden [10].

Ytterligare kostnader finns att tjäna om det material som inryms inom huvudramens profil i mitten (öppningen för skärmen) utnyttjas till andra föremål. Materialkostnaden för detta kasserade material är ca 200 kr.



9.2.1 Sammansättning mellan fram- och bakstycket

Bakstycket och framstycket möter varandra med bakstyckets elektriskt ledande laminatända mot framstycket innanför en överlappande kant, *se figur 137*. Kanten fungerar som styrning och skyddar mot insyn utifall bakstyckets laminatkant skulle vara något ojämn. För att styra bakstyckets kant mot framstycket så att den inte kan glid inåt finns stödtorn som stödjer mot bakstyckets insideskant, *se figur 137*.

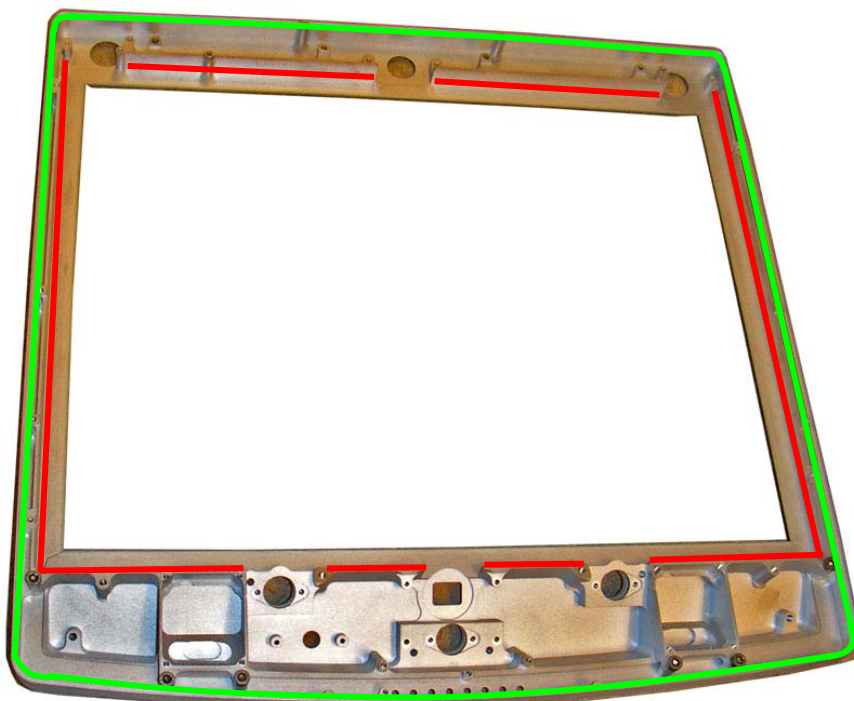
Bakstycket skruvas fast mot framstycket med 10 stycken maskingängade M4-skrivar i skruvtorn som sitter i framstycket via distanser och i fotmekanikneslutningarna.



Figur 137: Delförstoring av insidan av framstycket, övre hörnet

För att förbättra den elektromagnetiska skärmningen vilket är avgörande för att eye-trackern skall kunna bli EMC-godkänd [15] utnyttjas två metoder:

- **Dispensering** (*se figur 74*) av ledande elastisk pasta på kanten av framstycket som jämnar ut trycket mot bakstyckets laminatkant och säkerställer kontakt hela vägen ifall laminatkanten skulle vara något ojämn, Dispensering sker hos *Bomans Lackering*.
- **Fabric-over-foam-list** (FOF) (*se figur 75*) som klistras på ytterkanten av TFT-modulen (rostfritt stål) som ansluter mot stödramen i framstycket.



Figur 138. Framstycke där lösningarna för att åstadkomma elektrisk skärmning är markerade:

Grönt = dispensering av ledande pasta utmed kanten som ansluter mot bakstyckets kolfiberkompositkant

Rött = fabric-over-foam-list klistrad mot ytterkanten av TFT-modulen och ansluter mot framstyckets stödram



9.3 Slutgiltig konstruktion - ③ Fot

Material: Aluminium, EN 7075-T6 (höghållfast härdad legering)

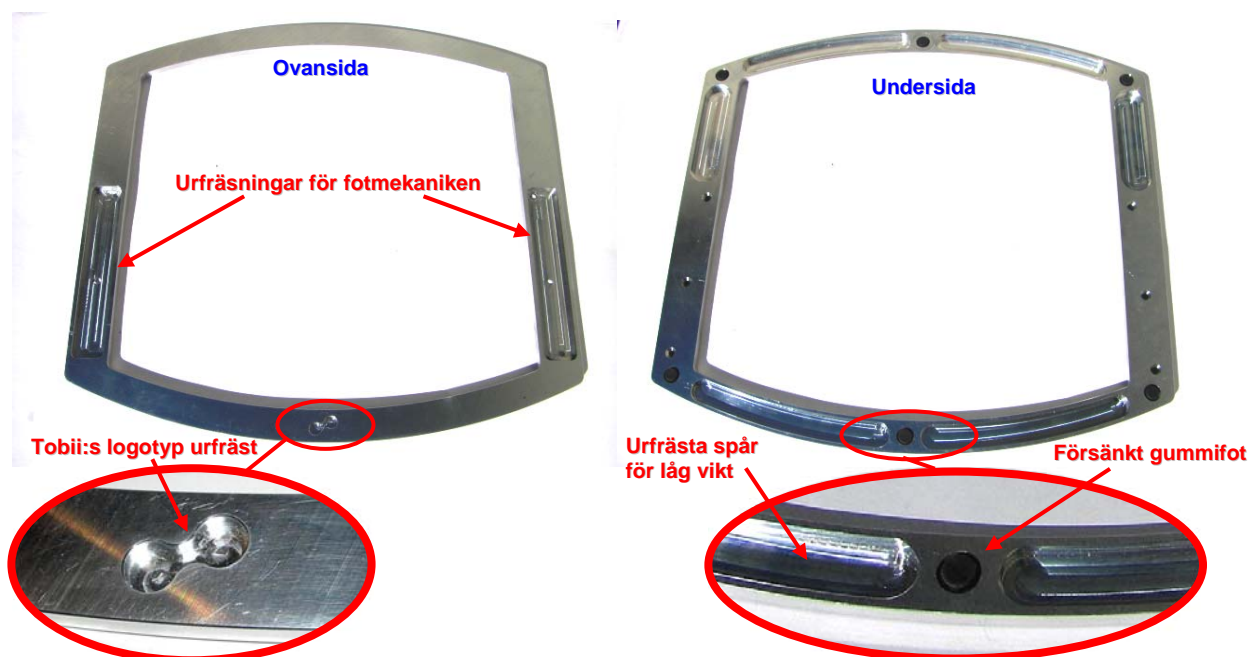
Produktionsmetod: CNC-fräsning, 3 axlig

Tillverkare: LG-produktion

Efterbearbetning: Pulverlackering

Dimensionering: T = 8mm, urfräst

Vikt: 420 gram



Figur 139, 140: Olackad fot med inringade detaljförstoringar, vänster: ovansida, höger: undersida

Foten är CNC-fräst hos *LG-produktion* (samma företag som fräser framstycket) ur en åttamillimeters aluminiumplåt. Marknadens starkaste aluminiumlegering har valts (EN 7075-T6) vilket garanterar att foten inte kan böjas [10] under ovarsam hantering, vilket annars skulle kunna leda till att eye-trackern vickar eller gungar.

För att ge hög böjstyvhet i förhållande till vikten har foten urfrästa spår på undersidan (se figur 140) samt på ovansidan (se figur 139) där fotmekaniken sitter för att minimera tjockleken tillsammans med fotmekaniken.

I framkanten är Tobii:s logotyp infräst (se figur 139) vilket gör att den exponeras diskret både då foten används och då eye-trackern används med en monitorarm och foten är infälld.

Sex självhäftande gummifötter från 3M är infällda i fotens undersida (se figur 140). Dessa gör att eye-trackern sitter säkert på bordet utan att glida eller riskera repa bordsytan. Infällningen gör att gummifötterna är lätta att montera och sitter säkert.



Foten pulverlackeras med grovkornig svart pulverlack hos *Bomans lackering*. Denna färg är tålig, eventuella repor som uppkommer under bruk döljs effektivt [13]. Den grovkorniga svarta ytan gör dessutom att foten uppfattas som tung och stabil [20] vilket inger förtroende om stabilitet.

Volymökningsmöjlighet

Vald produktionsmetod, CNC-fräsning tillåter höga volymer. Fräsningen är enkel och går snabbt [10]. Eftersom en del av kostnaden är kasserat material, det som inryms inom fotens profil är det önskvärt att vid större volymer återanvända denna plåt till andra föremål, varvid kostnaden bör kunna sänkas med ca 100 kr (beräknat utifrån materialkostaden för den kasserade biten höghållfast aluminium).



9.4 Slutgiltig konstruktion - 4 Fotmekanik

Antal tillverkade individuella delar: 10 st

Material: Aluminium, EN 6082-T6, stål, POM (plast)

Produktionsmetod: Stansning, bockning, laserskärning, CNC-fräsning 3 axlig, svarvning

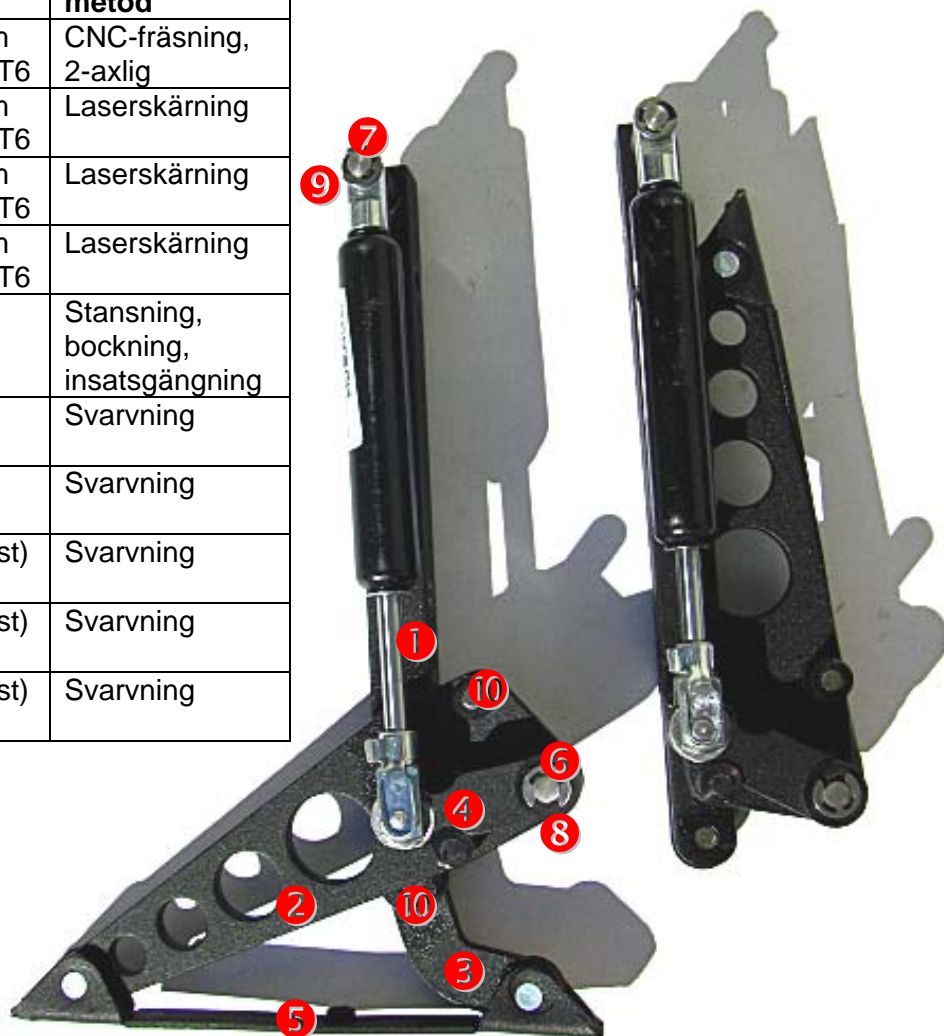
Tillverkare: Plåt & Mekano (P&M)

Efterbearbetning: Trumling, pulverlackering

Gasfjädrar: Aditech 6-15, 250 Newton

Vikt: 580 gram (par inkl gasfjädrar)

Del	Material	Produktionsmetod
1 Huvuddel	Aluminium EN 6082-T6	CNC-fräsning, 2-axlig
2 Bakre länkarm	Aluminium EN 6082-T6	Laserskärning
3 Främre länkarm	Aluminium EN 6082-T6	Laserskärning
4 Snäppled	Aluminium EN 6082-T6	Laserskärning
5 Fotdel	Stål	Stansning, bockning, insatsgängning
6 Axel till snäppled	Stål	Svarvning
7 Axel till gasfjäder	Stål	Svarvning
8 Distans till snäppled	POM (plast)	Svarvning
9 Distans till gasfjäder	POM (plast)	Svarvning
10 Snäppled- stöd	POM (plast)	Svarvning



Figur 141, 142: Fotmekaniken i två positioner, vänster: foten ute, eye-trackern i vertikalt läge, höger: foten infälld



Fotmekaniken på Tobii 2150C är unik i förhållande till den som sitter på vanliga monitorer. Detta för att anpassas till eye-trackerns något annorlunda användningsområden, för att tillåta intuitiv flexibel lutningsinställning samt snabb och enkel infällning för maximalt transportbarhet.

I grunden har fotmekaniken tillsammans med foten på Tobii 2150C tre funktioner:

Balanserande funktion

Eye-trackern kan användas ända från något framåtlutande till nästan horisontellt läge, se figur 143-146.

Eye-trackerns vikt balanseras mot gasfjädrar i fotmekaniken.

Friktionen i lederna mellan fotmekanikens delar som uppkommer pga. gasfjädrarnas tryck hindrar eye-trackern från att sjunka eller stiga om eye-trackerns vikt och gasfjädrarnas motbalans inte skulle överrenstämman till hundra procent.



Figur 143-146: Demonstration av fotmekaniken som tillåter mycket stor vinkeländring av eye-trackern

Denna variationsmöjlighet gör att eye-trackern både användas som en vanlig monitor med betraktaren sittande framför, då den är inställd kring vertikalt läge och för att presentera en tidning på skärmen och låta användaren läsa tidningen på samma sätt som tidningar normalt läses; i ett betydligt mer horisontellt läge [31].

Tvålägesfunktion

När foten fälls in mot ryggen ändrar gasfjädrarna tillstånd med ett snäppande ljud. I detta läge strävar foten mot ryggen. Proceduren är den samma då foten skall användas, dra ut foten från ryggen varvid gasfjädrarna ändrar läge med ett snäppande ljud, varvid foten istället strävar efter att balansera eye-trackerns vikt då foten används.

Vid transport eller om eye-trackern skulle hängas upp i VESA-fästet fälls foten in mot ryggen. Foten sitter inte i vägen för VESA-fästet och eye-trackerns mått ökas bara marginellt jämfört med om foten helt hade avlägsnats.

Handtagsfunktion

I uppfällt läge kan foten användas som bärhandtag, se figur 147.



Figur 147: Foten är infälld och eye-trackern bärs med foten som handtag



Volymökningsmöjlighet

Alla produktionsmetoder som används för framställning av delarna till fotmekaniken är maskinella med låg manuell inblandning och därmed lämpliga vid stora serier. Däremot måste sammansättningen av delarna till stora delar ske manuellt vilket bör vara en flaskhals vid större serier och något som samtidigt minskar möjligheterna att sänka kostnaderna vid stora serier. Att automatisera denna process med specialframtagen automatik eller industrirobotar ger en för hög initial kostnad [24-25] och bör endast vara lämplig vid mycket stora seriestorlekar, långt över de seriestorlekar som Tobii ser som rimlig för en eye-tracker som 2150C inom en begränsad framtid. Möjligheten att flytta den manuella monteringen till låglöneländer har större potentiell men kan kräva omfattande styrning från Tobii:s sida något som inte är önskvärt. Den kompromiss som kan vara lämpligast är att välja en legotillverkare med svenska rötter som i sin tur har enheter i låglöneländer och kan förlägga det manuella arbetet dit utan ökat arbete för Tobii.



9.5 Slutgiltig konstruktion - ⑤ Kabelavlastare

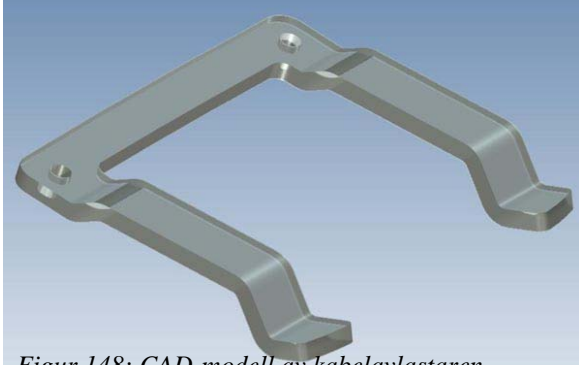
Material: Polykarbonat

Produktionsmetod: Fräsning, kallböckning

Tillverkare: Packningar & Plast

Dimensionering: T = 4 mm

Vikt: 15 gram



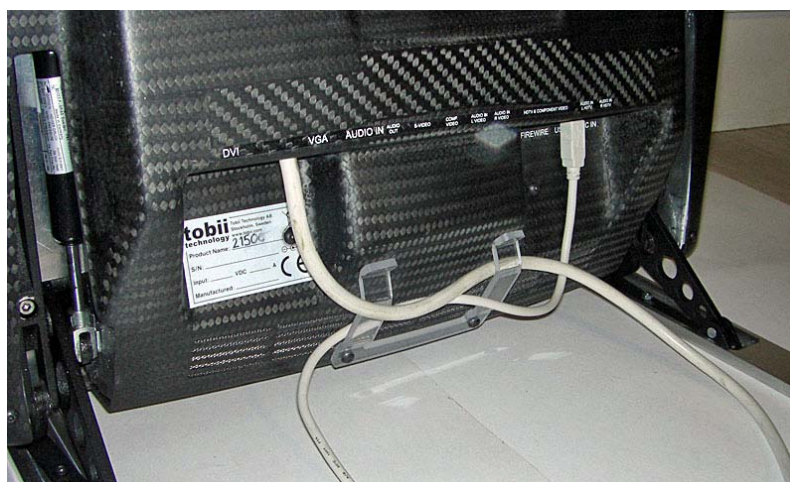
Figur 148: CAD-modell av kabelavlastaren

Kabelavlastaren är en liten men viktig detalj på eye-trackern. Denna styr kablarna och avlastar kontakterna som går in i kretskorten, vilket vid vanlig användning är minst fem kontakter. Utan kabelavlastare riskerar kontakterna eller kretskortet knäckas då eye-trackern vinklas mot ett horisontellt läge. Kabelavlastaren skyddar även kontakterna och kretskortet om någon kabel oavsiktligt skulle ryckas i.

Kabelavlastaren är en enkel konstruktion i polykarbonat (*Macrolon* eller *Lexan*), en transparent slagtålig plast, med två fjädrande fingrar som håller kablarna på plats (se figur 150). Den är framtagning genom fräsning och kallböckning hos *Packningar & Plast* och legotillverkare till dem. Kabelavlastaren är delvis integrerad i designen av bakstycket (se figur 149) men avviker samtidigt tillräckligt för att upptäckas då man sticker i kontakter i eye-trackern. Detta tillsammans med utformningen bör göra kabelavlastaren självförklarande.



Figur 149: Kabelavlastaren monterad på ett lackat bakstycke



Figur 150: Kabelavlastaren och dess funktion visas med två anslutna kablar. Vid vanligt bruk är minst fem kablar anslutna. Om inte kabelavlastaren används riskerar kontakterna brytas då man vinklar ner eye-trackern.

Volymökningsmöjlighet

Kabelavlastaren är producerad med metoder som ger kort processtid och hög automatiseringsgrad och därför är lämpade även vid större serier, långt över de för detta projekt maximala 300 stycken per år.



9.6 Slutgiltig konstruktion - ⑥ Komponentupphängning

Antal individuella delar: 9 st

Material: Aluminium, EN 5754 (lättbockad legering)

Produktionsmetod: Stansning, bockning

Tillverkare: LegoTech

Efterbearbetning: Kromatering

Dimensionering: Bärande delar: T = 1,5 mm, Övriga delar: T = 1 mm

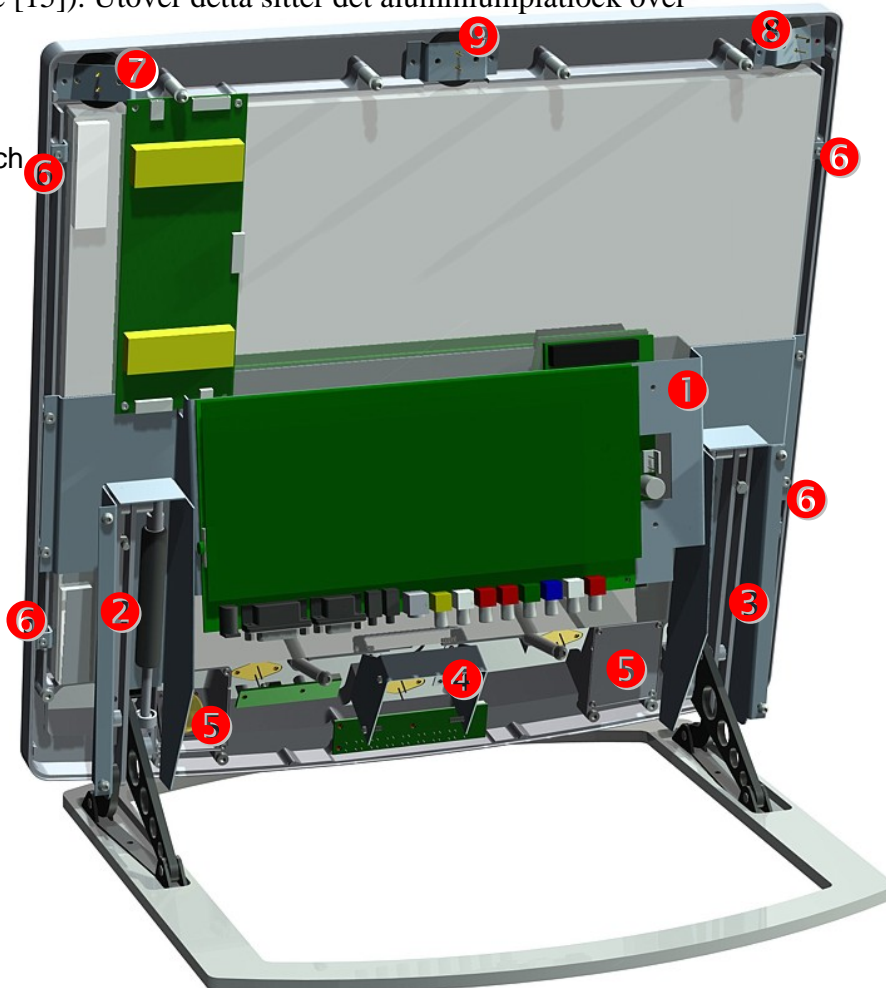
Vikt: 400 gram

Alla komponenter i eye-trackern fäster direkt eller indirekt i framstycket. För de delar som fästs indirekt mot framstycket utnyttjas fäst detaljer i stansad bockad aluminiumplåt, totalt 13 delar per eye-tracker varav 9 individuella (se figur 151 och 152). Aluminium ger låg vikt i förhållande till böjstyvheten och god värmeöverföring till framstycket för de komponenter som behöver kylning, främst LED:arna.

Det sitter även plåt detaljer kring fotmekaniken för att ge elektromagnetisk skärmning (fickor som fungerar som vågfångare [15]). Utöver detta sitter det aluminiumplåtlock över högtalarlådorna.

Delar:

- ① Kretskortsupphängning och stöd för fotmekanik
- ② Fotmekanikineslutning vänster
- ③ Fotmekanikineslutning höger
- ④ Kameraupphängning
- ⑤ Högtalarlock
- ⑥ TFT-upphängning
- ⑦ LED-upphängning vänster
- ⑧ LED-upphängning höger
- ⑨ LED-upphängning mitt



Figur 151: Tobii 2150C innanmäte, CAD-modell där bakstycket och kameran inte visas



Alla plåt detaljerna produceras av *LegoTech*. Detaljerna är utvecklade i CAD-miljö tillsammans med en konstruktör hos *LegoTech* för att passa deras stans- och bockningsutrustning. Produktionsmetoden är mycket flexibel det går snabbt och till en låg kostnad att ändra plåt detaljer ifall någon komponent skulle förändras. Stansning och bockning med den utrustning som utnyttjas medger även god repetering relativt hög precision, vilket är viktigt för att säkerställa att eye-trackningen fungerar bra.



Figur 152: Tobii 2150C innanmäte, nollserieexemplar utan bakstycke, fot och kamera, vid produktion är fotmekanikslutningarna svarta (svarteloxerade eller svartkromaterade) för att inte synas innanför framstycket

Volymökningsmöjlighet

Den typ av stansning och bockning som utnyttjas till plåt detaljerna i Tobii 2150C är produktionsmetoder med relativt hög automatiseringsgrad och kort processtid. Produktionsmetoderna lämpar sig därför väl vid större serier, långt över vad som ansetts som rimligt för detta projekt (300 eye-trackers per år).



10 Utvärdering

Nedan listas en jämförelse mellan de i förväg uppställda skallkraven och börkraven (se kapitel 5). Där det har varit möjligt har kravformuleringen förkortats och i vissa fall slagits samman.

10.1 Jämförelse mellan skallkrav och resultat

Skallkrav	Resultat	Kommentar
Maxvikt för framstycket och bakstycket tillsammans: 2 kg	Vikt för framstycket och bakstycket tillsammans: 1,8kg	
Bakstycket skall dimensioneras för att vara minst lika styv som motsvarande 1,5 mm stålplåt .	Bakstyckets form, att den bildar en sluten profil tillsammans med framstycket och praktiska prov har påvisat att bakstycket har kunnat dimensioneras mycket tunnare än motsvarande 1,5 mm stålplåt.	<i>Se Dimensionering, kapitel 8.5.1.</i>
Produktionsprocessen för detaljerna skall anpassas för 30 stycken enheter per år och 10 enheter per beställning , en volymökning från 30-300st/år skall beaktas, lämplig process skall utredas och dokumenteras.	Alla produktionsmetoder är anpassade för en seriestorlek på 30-300 st/år och 10 st/beställning, fotmekaniken beställs om minst 30 par/beställning för minimera kostnaden.	<i>Se även Material och produktionsmetoder kapitel 8.5</i>
Elektrisk kontakt mellan fram- och bakstycke skall säkerställas.	Ändan av bakstyckets kolfiberlaminat mot den dispenserade ledande pasta i framstycket ger god elektrisk kontakt. Rostfritt nät framför alla hål fungerar som vågfångare [15] och stoppar eventuellt läckage av högfrekvent elektromagnetism.	<i>Se även Slutgiltig konstruktion – sammansättning fram- och bakstycket kapitel 9.2.1, Samt slutgiltig konstruktion – bakstycket kapitel 9.1.</i>
Formarna skall utformas så att de med mindre förändringar kan anpassas då hårdvarans utseende förändras .	Upphängning av alla elektriska komponenter i framstycket, CNC-fräsning av framstycket tillåter omprogrammering för att anpassa efter komponentändring. Vissa komponenter är upphängda i stansade och bockade plåtdetaljer , dessa modifieras snabbt och billigt . Vid krav på förändring av bakstycket kan Marström modifiera pluggen [7] och snabbt ta fram en ny form .	
Kompositdetaljerna skall ha ”kolfiberutseende” .	Kolfiberbakstycket är uppbyggd av pre-preg med 2x2-twillväv som ger karakteristiskt ”kolfiberutseende” [5], bakstycket klarlackas två lager med sandpappning mellan för att uppnå toppfinish.	



Skallkrav	Resultat	Kommentar
Tillverkningskostnaden för fram- och bakstycke tillsammans inkl verktygskostnaden skall understiga 6000 kr/st vid tillverkning om 30 st.	Styckekostnad framstycket inkl pulverlackering: 3200 kr [10, 13], CAM-bearbetning framstycket 60 000 kr, styckekostnad bakstycket inkl vattenskarvning och lackering: 3400 kr [7, 23], kostnad för form till bakstycket: 10 000 kr [7] Kostnad vid 30 st, fram- och bakstycket tillsammans, inkl verktygskostnaden: 8900 kr.	<i>Under projektet har Tobii nedprioriterat verktygskostnaden då de ansett 30 st vara en för låg volym under Tobii 2150C livslängd, en rimligare volym ligger över några hundra. Vid större seriestorlekar uppfylls skallkravet.</i>
Tillverkningskostnaden för monitorfoten inkl verktygskostnaden skall understiga 2000 kr/st vid tillverkning om 30 st.	Styckekostnad foten: 800 kr, CAM-bearbetning: ingår i CAM-bearbetning av framstycket, foten står endast för liten del uppskattningsvis 3000 kr, Styckekostnad inkl CAM vid 30 st: 900 kr Styckekostnaden för fotmekaniken: 1000 kr, Produktifiering/framtagnings av prototypserie: 12 000 kr, Styckekostnad inkl produktifiering vid 30 st: 1400 kr Total styckekostnad, fot tillsammans med fotmekanik, vid 30 st: 2300 kr.	<i>Kostnadsökningen har godkänts av Tobii [9, 15, 31] då komplexiteten hos fotkonstruktionen är betydligt högre än vad som förutspåddes då kravspecifikationen ställdes upp. Den ökade nyttan som denna fotkonstruktion ger, överväger den högre kostnaden.</i>
Fästdon skall anpassas så att de tål montering och demontering , samt tåla vibrationer under transport.	Endast skruvar, muttrar, insatser och gängade hål med maskingänga som klarar montering och demontering används , vid montering appliceras gänglås (Loctite) för att skruvarna inte skall skaka loss under transport.	
Bakstycket skall vara utrustad med VESA-fäste med 75x75 millimeters hålmönster, bakstycket skall ha en plan yta om minst 100x100 millimeter kring VESA-fästet.	Bakstycket har VESA 75x75-fäste, plan yta kring fästet: 110x110 millimeter , VESA-fästets fyra M4-gängor är i form av trycktäta blindmuttrar.	<i>Se figur 95</i>
VESA-fäste skall vara placerat så nära eye-trackerns tyngdpunkt som möjligt.	Avstånd från TFT-skärmens framsida är endast 65 mm, jämfört med 105 mm för den gamla Tobii 2150 med plåtchassi. Avståndet från VESA-fästet till tyngdpunktcentrum är 45 mm (<i>beräknat med hjälp av CAD-program</i>), i höjd och sidled neutralt placerad.	
Eye-trackerns alla kontaktdon skall vara åtkomliga på baksidan .	Alla kontaktdonen är åtkomliga både när eye-trackern används med den vanliga foten och då foten är i uppfällt läge och eye-trackern används med monitorarm. Alla kontakter är märkta på bakstycket med en specialframtagen fastklistrad sticker (transparent bakgrund, vit text). Kontakterna skyddas genom att kablarna hålls av en tvåarmade fjädrande transparenta kabelavlastare.	



Skallkrav	Resultat	Kommentar
<p>Kamera och LED:ar skall placeras med samma X-ledsmått och vinklar som för den gamla 2150-eye-trackern med plåtkassi. Y-ledsmåtten skall minimeras för att flytta dem så nära TFT-modulen som möjligt</p>	<p>X-ledsmåtten för komponenterna under TFT-modulen är samma som för den gamla 2150-eye-trackern. X-måtten för de övre yttre LED:arna har ändrats, de har flyttats närmare centrum för att minimera eye-trackerns yttermått, detta efter överenskommelse med Tobii [9]. Y-ledsmåtten har minskats och alla komponenter har flyttats mot TFT-modulen, genom integrering av de nedre LED:arna i framstycket, genom fräsa ner kylelementen till de övre LED:arna och genom att utnyttja en mindre optik till kameran. Dessa förändringar har påverkat blickfångningsutrustningens egenskaper positivt [9, 12]. Den nya eye-trackern har även kompletterats med en koaxiell belysning (integrerad i framstycket) för att åstadkomma bright-pupil-effekt (<i>se kapitel 7.2.1</i>). Tobii 2150C passar därmed även för babylabsmarknaden.</p>	<p><i>Se även Måtttritingen för, belysare och kamera, Bilaga 2.</i></p>
<p>Vinkel mellan fot och eye-tracker skall vara ställbar. Fotens placering skall vara mitt under eye-trackerns tyngdpunkt vid neutralt inställd vinkel och aldrig hamna i instabilt läge oavsett vinkelinställning mellan skärm och fot</p>	<p>Vinkeln mellan fot och eye-trackern är steglöst inställbar från något framåtlutande till nästan horisontellt läge, från -6 grader från vertikalplanet till 10 grader från horisontalplanet. Oavsett vinkelinställning är eye-trackerns stabil. Inställningen är intuitiv, med ett lätt i eye-trackerns sidor ändras lutningen till önskad, eye-trackerns vikt balanseras av gasfjädrar i fotmekaniken. Den stora variationen gör att eye-trackern både kan användas som en traditionell monitor och för att simulera tidningsläsning på skärmen vid annonsutvärdering [31].</p>	
<p>Foten får inte störa åtkomst av kontaktdonen på baksidan</p>	<p>Foten stör aldrig åtkomsten av kontaktdonen oavsett om den är i utfällt läge eller uppfällt läge</p>	
<p>Tillräcklig ventilation skall finnas för att säkerställa att elektroniken inte blir överhettad</p>	<p>De värmeproducerande komponenterna som kräver kylning (främst LED:arna) är fästa mot det värmeledande aluminiumframstycket, kylningen av detta sker genom dess stora yta mot utsidan. Vidare har bakstycket kylhål nertill och upp till som tillåter att luften strömmar genom eye-trackern nerifrån och upp genom naturlig själventilation som uppstår då den uppvärmda luften stiger</p>	
<p>Ventilationshålen skall vara utformade enligt minst IP 20, dvs. hålstorlek max 12 mm utan strömförande eller heta föremål under hålen</p>	<p>Alla ventilationshål är täckta med finmaskigt nät i rostfritt stål och uppfyller därmed den högre IP-klassningen IP 40</p>	<p><i>Se IP-klasser, Bilaga 6.</i></p>



Skallkrav	Resultat	Kommentar
Tobii Technology's logotyp skall reliefgjutas in i bakstycket och eventuellt framstycket.	<p>Enligt överenskommelse med Tobii [9, 15, 31] och industridesigners [20, 34] har Tobii Technology's logotyp inte reliefgjutits in i bakstycket utan vattenskurits och fungerar därmed både som logotyp och som ventilationshål. Tillsammans med ett finmaskigt nät i rostfritt stål monterad under exponeras logotypen mycket väl.</p> <p>På framsidan exponeras logotypen mer diskret genom ett litet screentryck på höger hörna av det övre IR-filtret (<i>se figur 19</i>). Eftersom det är viktigt att inte dra bort brukarens uppmärksamhet från informationen som presenteras på TFT-skärmen [31, 33] är detta en bra kompromiss.</p>	<i>Se figur 20 och 124.</i>
Vid utformning av delarna skall beaktande tas till transportbarheten så att eye-trackern kan packas ner i ett så platt och kompakt paket som möjligt.	<p>Alla mått har minimerats i förhållande till den gamla eye-trackern med plåtchassi trots att foten har integrerats:</p> <p>bredden från 511 mm till 482 mm tjockleken från 169 mm till 125 mm höjden från 533 mm till 467 mm <i>(höjd inklusive infälld fot = 500 mm)</i></p> <p>Vid kortare transporter kan eye-trackern bäras i den bygel som den infällda foten bildar (<i>se figur 147 och 155</i>). Vid längre transporter och för flyg har en specialtillverkad hjulförsedd väska (flight-case) tagits fram (<i>se figur 156 och 157</i>) som inrymmer eye-trackern och all nödvändig kringutrustning.</p>	<i>Se Måtttrinng Bilaga 1.</i>



10.2 Jämförelse mellan börkrav och resultat

Börkrav	Resultat	Kommentar
Maxvikten för bakstycke och framstycke tillsammans bör understiga 1,5 kg	Vikt för framstycket och bakstycket tillsammans är 1,8kg	<i>Dock integreras komponentkyllning och komponentuppgängning i framstycket som om de hade varit separata hade gett en högre sammanlagd vikt. Även vikten för separata komponentupphängningar har minimerats genom att välja material med låg vikt i förhållande till böjstyvheten (aluminium) och valt olika godstjocklek beroende på belastningen</i>
Maximal tillverkningskostnad för fram- och bakstycke tillsammans inkl verktygskostnad bör understiga 3000kr/st vid tillverkning av 30 st	Kostnad vid 30 st, fram- och bakstycket tillsammans: 8900 kr <i>För utförlig redovisning se under Jämförelse mellan skallkrav och resultat, kapitel 10.1.</i>	<i>Börkravet uppfylls inte, något som accepterats av Tobii [9, 15, 31]. Om eye-trackern hade varit mer prispressad skulle det ha varit viktigare att optimera kostnaderna genom att pruta hos existerande legotillverkare, byta till billigare legotillverkare eller byta till billigare produktionsmetod som varmformning (se kapitel 8.4.1)</i>
Tillverkningskostnaden för monitorfoten inkl verktygskostnaden bör understiga 1000 kr/st vid tillverkning om 30 st.	Total styckekostnad, fot tillsammans med fotmekanik, vid 30 st: 2300 kr <i>För utförlig redovisning se under Jämförelse mellan skallkrav och resultat, kapitel 10.1</i>	<i>För motivering till kostnadsskillnaden se Jämförelse mellan skallkrav och resultat, kapitel 10.1</i>
Vinkel mellan fot och eye-trackern bör vara ställbara från horisontellt läge till -20 grader från vertikallplanet.	Eye-trackern är inställbar från -6 grader från vertikallplanet (dvs. något framåtlutande) till 10 grader från horisontallplanet.	<i>Kompromissen att eye-trackern inte kan luta framåt mer än 6 grader har accepterats för att medge vald fotmekaniklösning och samtidigt minimera eye-trackerns mått när foten är infälld. Praktiska prov har visat att det är ovanligt att eye-trackern någonsin ställs framåtlutad. Vid dessa undantag hänvisas kunden till att hänga upp eye-trackern i en monitorarm. Vidare har praktiska prov visat att helt vertikal inställning av eye-trackern saknar nytta då det förutsätter att brukaren befinner sig rakt ovanför eye-trackern. I praktiken befinner sig brukaren alltid något framför eye-trackern varför 10 grader från horisontallplanet är fullt tillräckligt.</i>



Börkrav	Resultat	Kommentar
Foten bör vara reglerbar i höjdledd.	Foten är inte inställbar i höjdledd.	<i>Tobii [9, 15] har prioriterat att eye-trackern hamnar så lågt som möjligt oavsett vinkelinställning, stor möjlighet till vinkelinställning och möjligheten att ha en integrerad fot som kan fällas in vid transport högre än höjdregeringsmöjligheter. Kunder som måste ha möjlighet att reglera eye-trackerns höjd hänvisas till att hänga upp eye-trackern i en monitorarm.</i>
Ventillationshålen bör vara utformade enligt minst IP 30, dvs. petskyddade med max hålstorlek 2,5 mm.	Ventillationshålen uppfyller den högre IP-standarden, IP 40 , och är petskyddad med föremål ner till 1 mm.	<i>Se IP-klasser, Bilaga 6.</i>
Vid transport bör foten ingå i paketet tillsammans med skärmen utan att behöva monteras av.	Foten fälls enkelt upp mot ryggen vid transport. Fotmekaniken har två stabila lägen, ett då den strävar efter att balansera eye-trackerns vikt då foten används, och ett när den strävar mot ryggen då foten är uppfälld.	<i>Se figur 153.</i>
Produktionsprocessen bör väljas så att en volymökning till 300 enheter per år är möjlig med begränsade förändringar.	Med de valda produktionsmetoderna är det möjligt med en årsvolym på 300 eye-trackers . Vid stora serier (mer än 100 eye-trackers per år) kan det bli nödvändigt att framställa fler formar för bakstycket utifrån den existerande pluggen. Detta kan <i>Marström</i> göra relativt snabbt (på någon vecka) till begränsad kostnad (under 10 000 kr) [7].	<i>Detta börkrav har under projektets gång i och med Tobii:s starka tillväxt omvandlats till ett skallkrav.</i>



11 Övergripande resultat

Nedan listas kortfattat de viktigaste resultaten av projektet och den framtagna eye-trackern, Tobii 2150C:

- Låg vikt: 7,8kg (föregångaren vägde 14,3 kg), vikten är inte högre än för motsvarande monitor utan eye-tracking-teknologi
- Anpassade produktionsmetoder, upparbetat samarbete med lämpliga tillverkare
- Väl mottagen design [51, 31]
- Unik flexibel gasfjäderbalanserad tvålågesfot



Figur 153, 154. Demonstration av foten i olika lägen
Vänster: Foten uppfälld, Höger Foten utfälld, eye-trackern inställd i ett relativt horisontellt läge anpassad för att presentera en virtuell tidning

- Transportabel



Figur 155-157: Demonstration av eye-trackerns transportbarhet:
Vänster: Eye-trackern kan bäras med foten som handtag vid kortare transporter
Mitten: Vid längre transporter utnyttjas den hjulförsedda specialframtagna väskan (flight-case)
Höger: Väskan visas öppen, väskan inrymmer eye-trackern och alla dess tillbehör i olika fack

- Positiv feedback från kunderna:
Feedback från MediaScore, en av Tobii:s återförsäljare, vidarebefordrat via e-mail från Tobii:s VD Henrik Eskilsson [31], 2006-10-25:
” MediaScore received their Tobii 2150 yesterday and they are really impressed by the design of the unit. “our customers will love it”
“It looks great and the desk stand solution with the tilting is just wonderful.” ”
- Officiellt i Tobii:s sortiment [1] sedan sommaren 2006 – se bilaga 7 för screen dump av Tobii:s hemsida med information om eye-trackern.



12 Referenser

Referenserna är i rapporten markerade inom hakparenteser (t.ex. [9, 15]).

1. www.tobii.com – Tobii Technology's hemsida, *information tagen 2005 till 2007*
2. Personlig kommunikation med **Kjell Bengtsson** – FFF-ansvarig hos Solidmakarna, demonstration av FFF samt diskussion kring tillvägagångsätt och detaljlösningar för friformsframställning av prototyppluggar till bakstycke och fot, *våren 2008*
3. www.vattenskarning.se/swa.html - information om vattenskarning, *information tagen hösten 2007 till våren 2008*
4. **Nära färdig form**, Kompendium, KTH Maskinteknik
5. www.fiber.info.se – Fiberkompositlaminering – Handbok kring konstruktion med fiberarmerade härdplaster för hobbybruk och mindre industri, *information tagen hösten 2007 till våren 2008*
6. **Materiallära**, Ullman E (1997), Upplaga 13, Liber, ISBN 91-47-00157-7
7. Personlig kommunikation med **Pär Wärn** – VD Marström Composite, demonstration av autoklavbakning av pre-preg samt diskussion kring detaljlösningar för bakstycke i pre-preg-kolfiberkomposit, *hösten 2005 till våren 2006*
8. Personlig kommunikation med **Gunnar Swärd** – VD, Epotex Säljservice – diskussion kring laminering med epoxi, *hösten 2005 till våren 2006, samt våren 2008*
9. Personlig kommunikation med **Mårten Skogö** – Chef för hårdvaruutvecklingsavdelningen Tobii, eye-tracking-teamet, uppdragsgivare, information kring eye-tracking samt diskussionspartner inom alla led av utvecklingen av eye-trackern, *hösten 2005 till våren 2006*
10. Personlig kommunikation med **Ulf Åström** – VD LG-produktion, demonstration av CNC-fräsning, samt diskussion kring NCN-fräsning av framstycket och foten, detaljlösningar och tips, även information kring hur CAM-processen går till, *våren 2006*
11. **Manufacturing of Polymer Composites**, B.T. Åström (1997), upplaga 1, Chapman & Hall, ISBN 0-412-81960-0
12. Personlig kommunikation med **Gunnar Troili** – algoritmprogrammerare Tobii, information kring hur eye-tracking-mjukvaran fungerar, diskussion kring placering av eye-trackingkomponenterna, *hösten 2005 till våren 2006*
13. Personlig kommunikation med **Anders Johansson** – Bomans lackering, demonstration av tryck, pulverlackering, dispensering, kromatering och eloxering, diskussion kring detaljlösningar inom dessa områden, *våren 2006*
14. www.quicknet.se/hdc/ord/ord_ea2m.htm - teknisk ordlista med förkortningar, *information tagen våren 2008*
15. Personlig kommunikation med **Bengt Rehnström** – Elektronikkonstruktör Tobii, handledare av exjobbet, diskussionspartner inom alla led, information kring allt elektronikrelaterat, *hösten 2005 till våren 2006*
16. **Karlebo handbok** (2000), Upplaga 15, Liber, ISBN 91-47-01558-6
17. **Formler och Tabeller för Mekanisk Konstruktion**, Karl Björk, upplaga 5



18. www.expandermetall.se/ - Expandermetall, företaget som tagit fram nätet bakom ventillationshålen i 2150C bakstycket, *information tagen våren 2006*
19. Personlig kommunikation med **Mikael Brinkberg** – Pro Case, samarbete kring utveckling av specialanpassad flight-case till 2150C eye-tracker, *våren 2006*
20. Personlig kommunikation med **Ian Feldman** – Industridesigner, generellt information och diskussion kring industridesign, Utvärdering av fotkonstruktion, utvärdering av prototyp, *hösten 2005 till våren 2006 samt hösten 2007 till våren 2008*
21. Personlig kommunikation med **Roger Karlsson** – VD MM Tech cast, demonstration av gipsgjutning och diskussion kring denna produktionsmetod för framstycket samt detaljlösning, *hösten 2005 till våren 2006*
22. www.epotex.se - Epotex, leverantör av epoxiprodukterna använda inom projektet, *information tagen våren 2006 samt våren 2008*
23. Personlig kommunikation med **Peter Åhlander** – VD PÅ-vattenskärning, demonstration av vattenskärning, diskussion kring vattenskärning av bakstycket i kolfiberkomposit, *våren 2006*
24. Personlig kommunikation med **Olle Jönsson** – lärare inom produktionsteknik, Institutionen för Tillämpad IT, KTH-Kista, diskussion kring alternativ vid maskinbearbetning av metaller, samt information om produktionsteknik för framställande av termoplastdetaljer, *hösten 2005 till våren 2006*
25. Personlig kommunikation med **Hilding Hellström** – Ansv. teknisk beredning, Plåt & Mekano (P&M), Produktionsanpassning av fotmekaniken, demonstration av bockning, stansning, laserskärning och trumling, *våren 2006*
26. **Polyuretaner / Polyuretanelastomer**, Informationsblad, Oktober 2002, Plast & Kemiföretagen
27. **Kompositboken** C-G Gustafson (1988) upplaga 2, Plats- och Gummitekniska Institutet
28. Personlig kommunikation med **Arne Ryd** och **Patrik Nilsson** – Water Jet Sweden Skärcenter, diskussion kring vattenskärningsalternativ för bakstycket i kolfiberkomposit, *våren 2006*
29. Personlig kommunikation med **Carlos Michea** – VD Sydjet, diskussion kring möjligheterna och problemen vid vattenskärning, *hösten 2005 till våren 2006*
30. www.vesa.org – VESA, standardiseringsorgan för bland annat VESA-fästen, *information tagen våren 2005 samt våren 2008*
31. Personlig kommunikation med **Henrik Eskilsson** – VD Tobii, produktägare till eye-trackern tobii 2150 och 2150C, kravställare och utvärdering i olika steg kring hur väl eye-trackern uppfyller de potentiella kundernas krav, *hösten 2005 till våren 2006*
32. Personlig kommunikation med **Anna Bergman** – Elektronikkonstruktör Tobii, diskussionspartner kring elektronik- och EMC-relaterat, *hösten 2005 till våren 2006*
33. Personlig kommunikation med **Anne Jansen** – säljare Tobii, utvärdering av designen utifrån kundkraven, *hösten 2005 till våren 2006*
34. Personlig kommunikation med **Jon-Karl Sundh** – Industridesigner, Myra Industriell Design AB, utvärdering av designförslag till chassiet utan fot



35. Personlig kommunikation med **Malin Åkermo**, KTH-Lättkonstruktion,Handledare och examinator, diskussion kring produktionsmetoder för bakstycket i fiberkomposit, *hösten 2005 till våren 2006 samt hösten 2007 till våren 2008*
36. Personlig kommunikation med **Tobias Blomberg** – VD Carbonia, demonstration av RTM, diskussion kring RTM som produktionsmetod för bakstycket, *hösten 2005 till våren 2006*
37. www.carbonia.se – Carbonia, företag som specialiserat sig på RTM, potentiell tillverkare av 2150C bakstycke, *information tagen hösten 2007*
38. Personlig kommunikation med **Kenneth Holmberg** – VD Swecomposite, diskussion kring bakstycke laminerad under vakuumbag, *hösten 2005 till våren 2006*
39. **Konstruktörens val av produktionsmetoder – nära färdig form**, Johansson J (1990), upplaga 1, Mekanikförbundets förlag, ISBN 91-524-1078-1
40. www.jltmobile.com – JLT, tillverkare av Tablet-PC:ar med chassier i fräst aluminium som tillverkas av LG-produktion, *information tagen våren 2006*
41. www.abic.se/ - ABIC, leverantör av gjutpolyuretanen och kolfibern använd inom projektet, information kring gjutpolyuretanen Rencast FC 52, *information tagen hösten 2005 till våren 2006, samt våren 2008*



13 Bilagor

Bilaga 1: Måttitning över Tobii 2150C eye-tracker

Bilaga 2: Måttitning för belysare och kamera i Tobii 2150C

Bilaga 3: Vikter för eye-trackerns delar

Bilaga 4: Legotillverkare som har varit involverade vid utveckling och tillverkning av eye-trackern

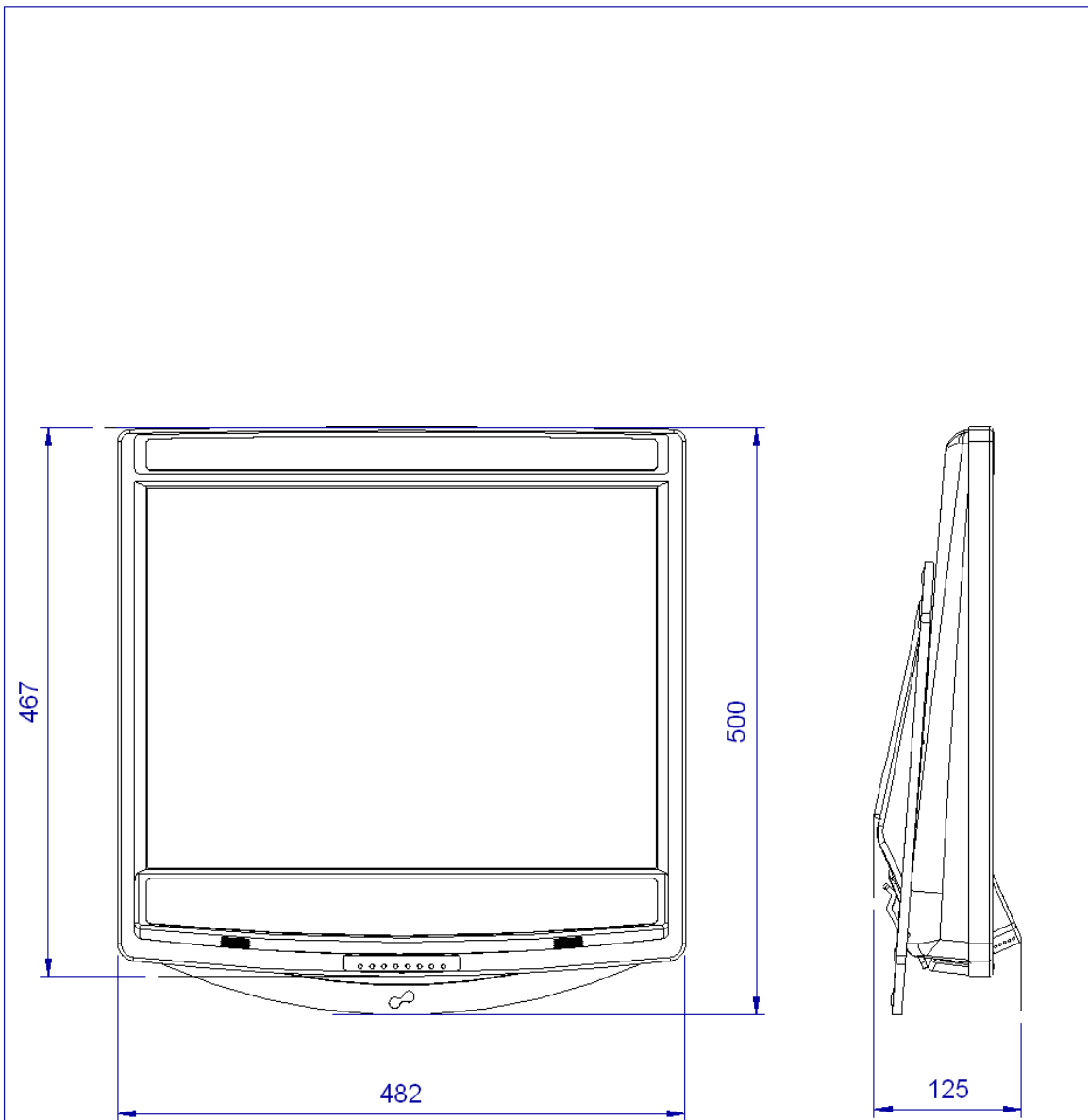
Bilaga 5: Kurser inom utbildningen som har utnyttjats inom exjobbet

Bilaga 6: IP-klasser för elektriska artiklar

Bilaga 7: Screen dump av Tobii:s hemsida 2007-05-09



13.1 Bilaga 1. Mått ritning Tobii 2150C eye-tracker



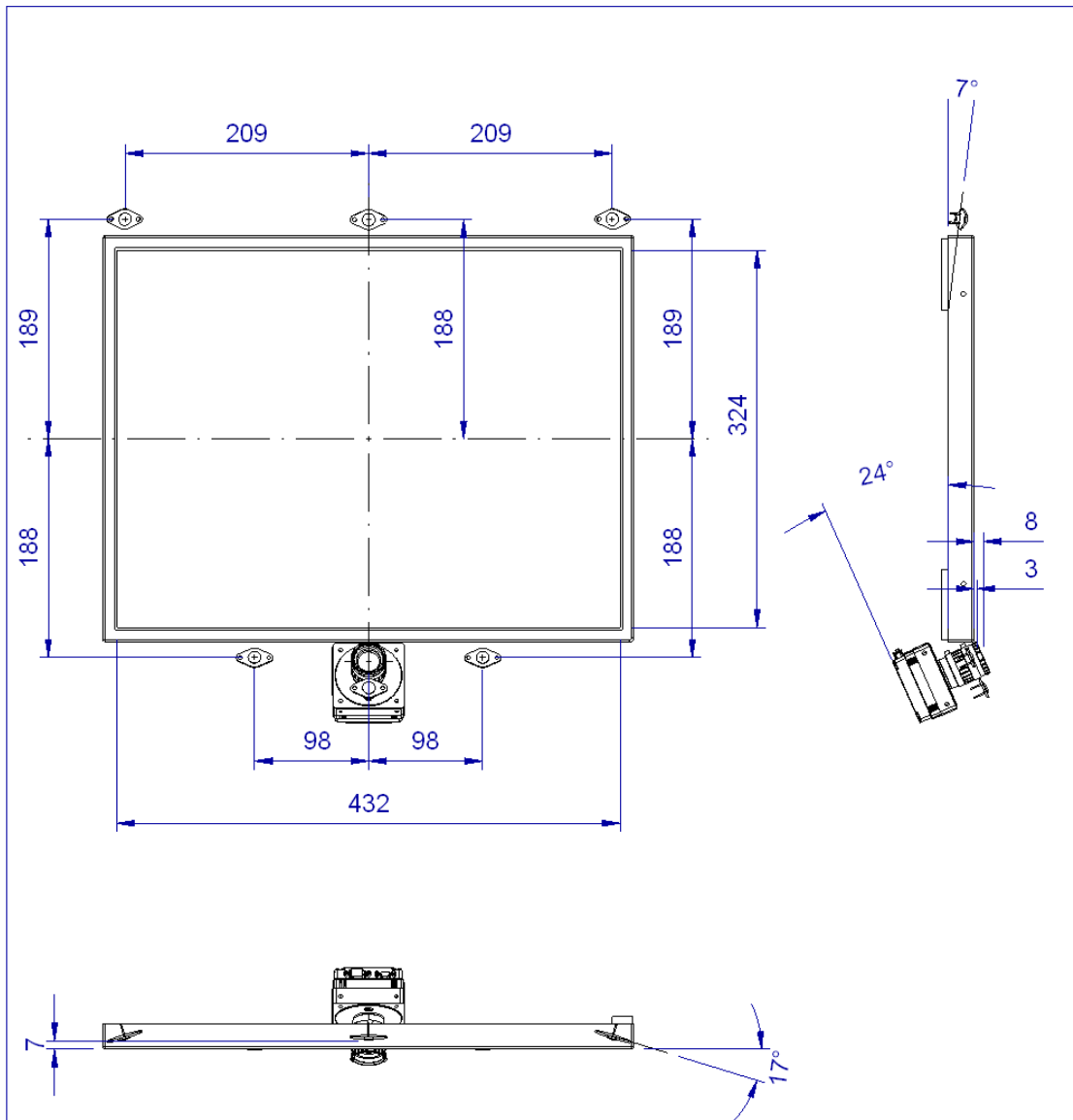
Detta dokument och dess innehåll tillhör FÖRETAGET AB. Innehållet får ej kopieras, reproduceras, övertasas eller skickas till tredje part, eller användas för syften som ej skriftligen godkänns.

A4 ISO E	IronCAD 2D-ritning, 3D-detalj tillgänglig.	Generella toleranser enligt:	Filnamn: matritning A4.icd			Senast sparad:	
	Skala: 1:5		Ritad av: ...	Kontrollerad av: ...	Godkänd av: ...	Skapad datum:	
Tobii Technology			Mått ritning Tobii 2150C eye-tracker, uppfäld fot			Blad nr: 1 (1)	Rev. ...
						Dok nr:	



13.2 Bilaga 2. Mått ritning för belysare och kamera i Tobii 2150C

Måttningen nedan visar utplaceringen av belysarna (IR-LED:arna) och kameran och deras vinklar gentemot TFT-modulen (bildskärmen). Dessa mått utnyttjas vid bildanalysen för att beräkna betraktaren tittar på skärmen.



Detta dokument och dess innehåll tillhör FÖRETAGET AB. Innehållet får ej kopieras, reproduceras, överföras eller stäckas till tredje part, eller användas för syften som ej skriftligen godkännts.

A4 ISO E	IronCAD 2D-ritning. 3D-detalj tillgänglig. Skala: 1:5	Generella toleranser enligt:	Filnamn: ledmatt A4.icd			Senast sparad:	
			Ritad av: ...	Kontrollerad av: ...	Godkänd av: ...	Skapad datum:	
Tobii Technology			Mått ritning, belysare & kamera Tobii 2150C			Blad nr: 1 (1)	Rev. ...
						Dok nr:	



13.3 Bilaga 3. Vikter för Tobii 2150C delar

Del	Vikt [gram]	Antal delar
<i>Tobii 2150C med kolfiberbakstycke och fräst aluminiumframstycke och flexibel fot</i>		
Bakstycke	720	4
<i>Huvuddel</i>	<i>600</i>	<i>1</i>
<i>Metallnät</i>	<i>40</i>	<i>2</i>
<i>Nätplåt</i>	<i>80</i>	<i>1</i>
Framstycke	1 100	2
Fotdel	1 000	11
<i>Fot</i>	<i>420</i>	<i>1</i>
<i>Fotmekanik</i>	<i>580</i>	<i>10</i>
Komponentupphängning	400	15
Skruvar, distanser	150	52
TFT-modul	3500	1
Elektronikkomponenter	930	13
Totalvikt	7 800	
<i>Föregående Tobii 2150 med stålchassi</i>		
Bakstycke	3 400	
Framstycke	2 200	
Fot	2 100	
Totalvikt	14 300	
<i>Föregående Tobii 2150 med aluminiumchassi</i>		
Bakstycke	1 200	
Framstycke	800	
Fot	2100	
Totalvikt	10 700	



13.4 Bilaga 4. Involverade legotillverkare

Följande legotillverkare har varit direkt involverade vid utveckling och tillverkning av eye-trackern:

- **Marström Composites**, Sailcenter – tillverkning av bakstycket i kolfiberkomposit, autoklavbakning av pre-preg, lackering
- **LG-produktion** – fräsning av framstycket och fot
- **P&M** (Plåt & Mekano) – produktionsanpassning och tillverkning av fotmekaniken
- **LegoTech** – tillverkning av plåtdetaljer
- **PÅ-vattenskarvning** – vattenskarvning av bakstycket och metallfilter
- **Bomans lackering** – lackering och kromatering av framstycket, tryck av knappfilter och logotyp, dispensering av ledande pasta
- **Packningar & Plast** – fräsning av IR-filter, tillverkning av kabelavlastare
- **Aditech** – framtagning av gasfjädrar med anpassad fjäderkraft
- **Expander Metal** – tillverkning av metallfilter under ventilationshålen
- **Solidmakarna** – framställning FFF-detalljer till prototyppluggar, leverantör av CAD-program (IronCAD)
- **ProCase** – utveckling och tillverkning av flight-case (väska) till eyetrackern
- **Skara Modellsnickeri** – friformsframställning av specialknappar för utvärdering

- **Potentiella legotillverkare:**
- **Carbonia** – RTM-specialist, potentiell tillverkare av bakstycket
- **Svensk kompositutveckling** – potentiell tillverkare av bakstycket genom vakuuminjicering
- **Swecomposite** – potentiell tillverkare av bakstycket genom våtlaminering och vakuumbagging
- **Infiniform** – tillverkare av system och material för kolfiberarmerat varmformningsbart termoplastbaserat material, potentiellt lämpligt för bakstycket
- **WaterJet Sweden** – vattenskarvning av bakstycken
- **Sydjet** – vattenskarvning av bakstycken
- **ModellTeknik** – potentiell framtagare av verktyg för gipsgjutning
- **Akroform** – potentiell varmformare av termoplastbakstycke och kabelavlastare
- **Rhino** - potentiell varmformare av termoplastbakstycke och kabelavlastare, även framtagning av träpluggar för lågserievarmformning
- **ARRK** – potentiell tillverkare av bakstycket genom RIM
- **MM Tech cast** – potentiell tillverkare av framstycket genom gipsgjutning i aluminium



13.5 Bilaga 5. Utnyttjade kurser

*Dessa kurser inom utbildningen på KTH som Lars Viebke har läst har berörts inom exjobbet, observera dock alla har **inte** utnyttjats då rapporten har skrivits.*

Fiberkompositer 1 – Material och processer 4E1124

Tillverkningsmetoder för framställning av fiberkompositer, beräkningar av mekaniska egenskaper för fiberkompositer.

Lättviktsdesign 4E1132

Framtagning av prototyper via skumplastpluggar

CAD 3D-modellering och visualisering för PC, 4F1541

CAD-modellering

Fördjupningsprojekt inom maskinteknik – ”Fiberkompositlaminering – handbok kring konstruktion med fiberarmerade härdplaster”, 6B2909

Tillverkningsmetoder för framställning av fiberkompositer

Nära färdig form (Produktionsmetoder för nära färdig form och tillämpad polymerteknik) 6B3202

Polymerteknik (termoplaster), FFF-metoder, metallgjutmetoder

Produktutveckling 6B3203

Industriell design, produktutvecklingsprocessen

Produktionsteknik grundkurs 6B2215

Produktionsmetoder för metallbearbetning, NC-programmering, metallgjutning

Produktionsteknik fortsättningskurs II 6B3214

Avancerad NC-programmering, CAM, produktionsmetoder för metallbearbetning

Konstruktionsteknik 6B2254

Grundläggande ritteknik, CAD-modellering

Hållfasthetslära 6B2212

Generella hållfasthetsberäkningar

Konstruktionsmaterial 6B2203

Materiallära både för metaller, plaster och kompositer

Konstruktionsmetodik 6B3201

Metoder för utvärdering under utveckling och konstruktion

Ellära 6A2103

Effektberäkning, elektromagnetisk strålning

Industriell ekonomi 1 6B3205

Relation mellan produktionskostnad och försäljningspris



13.6 Bilaga 6. IP-klasser för elektriska artiklar

Källa: Hämtat ur Kjell & Companys KjellFakta:
www.kjell.com/kjellfakta/ipklass/

Copyright: Kjell & Company

Eftertryck tillåts om innehållet återges i oförändrat skick tillsammans med en tydlig hänvisning till källan (www.kjell.com).

IP-klass

Elektriska artiklar märks med en IP-klass för att ange både graden av skydd mot åtkomst av strömförande delar och hur vatten och dammtät den är.

En elartikel märkt med IP 44 är

(Första siffran:) petskyddad mot föremål som överstiger 1 mm i diameter och (Andra siffran:) tål strilande vatten från alla vinklar.

Första siffran:

0 Inget skydd.

1 Petskyddad mot föremål större än 50 mm.

2 Petskyddad mot föremål större än 12 mm.

3 Petskyddad mot föremål större än 2,5 mm.

4 Petskyddad mot föremål större än 1 mm.

5 Dammskyddad

6 Dammtät

Andra siffran:

0 Inget skydd

1 Skyddad mot droppand vatten

2 Skyddad mot droppande vatten. Apparaten får ej luta mer än max 15° från normalvinkeln.

3 Skyddad mot strilande vatten. Max vinkel 60°.

4 Skyddad mot strilande vatten från alla vinklar.

5 Skyddad mot spolande vatten från munstycke

6 Skyddad mot kraftig överspolning av vatten (munstycke, sjö o.s.v.).

7 Kan nedsänkas tillfälligt i vatten utan att ta skada.

8 Lämpad för långvarig nedsänkning i vatten. Se tillverkarens råd.



13.7 Bilaga 7. Screen dump av Tobii:s hemsida

Urklipp av information kring eye-tracker 2150C på Tobii:s hemsida:

<http://www.tobii.com/default.asp?sid=846>

Datum: 2007-05-09.

OBS! Eftersom all information på Internet är dynamisk kan sidan ha förändrats eller utgått

The screenshot shows a web browser window displaying the Tobii website. The browser's address bar shows the URL <http://www.tobii.com/default.asp?sid=846>. The website header features the Tobii logo and the slogan "Use your Eyes". A navigation menu includes links for ABOUT US, APPLICATION AREAS, PRODUCTS & SERVICES, SUPPORT, NEWS & EVENTS, and CONTACT. The main content area is titled "Tobii 2150 Eye Tracker" and includes several sections: "Tobii provides a true revolution in eye tracking...", "The Tobii 2150 Eye Tracker is optimized for advertising testing...", "Plug and play eye tracking", "Completely non-intrusive", and "High tracking quality". A technical specifications table is located at the bottom of the page.

Accuracy	0.5°
Drift	< 1 degree
Freedom of head-movement	35 x 20 x 32 cm
Binocular tracking	Yes
Data rate	50 Hz
TFT Display	21.3" TFT, 1600 x 1200 pixels
Connectors	Firewire, USB, VGA, Power
Weight	~8 kg (17.6 lbs)
Desk stand tilt	0/-85°
Mounting	VESA
Interface	DVI, VGA, Audio and video interface (S-Video, Compensite Video, HDTV & Component Video)
Speakers	Integrated
Infant AddOn	Integrated