

# Robust og fleksibel automatisert montasje av trykkluftskoblinger

**Peter Sjølie**

Master i produktutvikling og produksjon

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Knut Sørby, MTP

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for maskinteknikk og produksjon



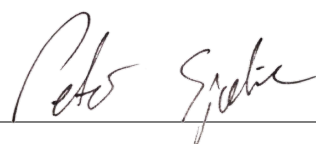
# Forord

Denne masteroppgaven er en del av faget TPK4940 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim (NTNU) våren 2017. Oppgaven skal tilsvare 30 studiepoeng. Masteroppgaven skrives som et samarbeid mellom Institutt for maskinteknikk og produksjon Valgrinda, og Kongsberg Automotive Raufoss (KA). Hovedveileder er professor Knut Sørby fra NTNU og medveileder er forsker Olivier Roulet-Dubonnet fra SINTEF. Kontaktpersoner fra KA er både Program Manager for Fluid Transfer Henning Rud, og R&D Manager Geir Liaklev. Oppgaven er i tillegg innlemmet som en del av forskningsområdet «Robust and Flexible Automation» under «SFI Manufacturing». Et av Forskningsrådets ulike Senter for forskningsdrevet innovasjon.

Jeg vil rette en spesiell takk til veilederne og kontaktpersonene i denne oppgaven. Knut Sørby har vært til stor hjelp med generelle spørsmål og utforming av oppgaven. Olivier Roulet-Dubonnet ved SINTEF har vært svært hjelpsom med sin kunnskap om visionssystemer og programmering. Henning Rud og Geir Liaklev har tatt meg godt i mot ved KA, og lagt til rette for et godt samarbeid. Henning har i tillegg vært tilgjengelig og satt av mye tid til samtale rundt problemstillingen, KA sine produkter og andre generelle spørsmål. Jeg vil også takke andre ansatte ved KA som har vært hjelpelige med informasjonssinnhenting, men spesielt prosessingeniør Thor Thorstad for sin hjelp med kartlegging av produksjonssystemene på Raufoss. Etter lang fartstid hos KA besitter Thorstad en uvurderlig detaljkunnskap om montasjeprosessen. Jeg vil dessuten takke forsker Sebastian Dransfeld ved SINTEF på Raufoss, og sivilingeniør Alvaro Capellan ved SINTEF i Trondheim. Dransfeld har gitt verdifulle tekniske innspill knyttet til montasje av KA sine produkter, og Capellan har vært veldig hjelpelig med praktiske spørsmål i forbindelse med laboratoriearbeid.

Arbeidet med oppgaven har vært krevende, men samtidig svært interessant og lærerikt. Jeg er takknemlig for å ha fått muligheten til å samarbeide med KA, og jeg håper oppgaven kan være første skritt i et videre arbeid med å realisere automatisert montasje av KA sine småserieprodukter. Dette er en oppgave jeg mener er utfordrende, men nødvendig, også for mange andre produksjonsbedrifter i Norge.

Trondheim, 11.06.2017



Peter Sjølie



# Sammendrag

Kongsberg Automotive Raufoss (KA) produserer et stort antall ulike koblinger til trykkluftsystemer på større kjøretøy. Hoveddelen av koblingene benyttes i bremsesystemer, og som følge av sikkerhetskravene stilles det svært høye krav til produktenes kvalitet. Med en årlig produksjon på mer enn 100 millioner produkter gjøres hoveddelen av montasjen med automatiserte maskiner, mens produktene med små serier monteres manuelt. En stadig økende etterspørsel etter kundespesifikke produkter gjør det i dag utfordrende for produksjonssystemet å levere nødvendig volum og kvalitet til en konkurransedyktig pris. Det er behov for et automatisert montasjesystem som takler utfordringene med lave volum, hyppige omstillinger, høye kvalitetskrav og et høyt antall ulike og små komponenter.

For å automatisere montasjen av lavvolumsproduktene har relevant teknologi og tilgjengelige systemer blitt undersøkt. Det har dessuten blitt samlet erfaringer fra tidligere prosjekter hos KA, NTNU og SINTEF. KA sine produkter og produksjonssystem har i tillegg blitt studert i detalj for å kunne dra nytte av den kunnskapen som allerede er opparbeidet på Raufoss. Resultatet av den omfattende informasjonsinnhenting er et forslag til en overordnet produksjonslayout, men også design av en spesifikk montasjecelle. Ulike design og tekniske løsninger er blitt diskutert, og parallelt med designutviklingen er det foretatt simuleringer av produksjonen for å optimalisere layouten. Det er i tillegg utført en økonomisk vurdering av løsningen.

For den overordnede layouten foreslås det å lage fire prosessorienterte montasjeceller som i fellesskap kan montere enhver kobling. Det er oppdaget ulike montasjeprosesser som naturlig skiller seg fra hverandre og som gjør det mulig å differensiere montasjen på en god måte. Denne inndelingen gjør det mulig å kombinere nødvendig fleksibilitet med både robust, kvalitetssikker og effektiv produksjon. Dette skiller seg fra dagens situasjon som deler produksjonen på bakgrunn av de ulike produktene.

Med bakgrunn i erfaringer gjort under designutviklingen er prosessen med lokalisering, griping og orientering av koblingshus studert i detalj. Griping er sentralt, og det er derfor designet en generisk, robust robotgriper som sørger for riktig orientering av koblingshusene. Griperfingrene er utviklet ved bruk av topologioptimalisering, og bygget additivt i rustfritt stål. I tillegg er det utviklet og testet bruk av vision for å lokalisere og gripe ulike koblingshus. Testingen ble utført med en industrirobot og et 3D-kamera. Programmet som lokaliserer koblingshuset benytter CAD-data som input, og kan benyttes for hvilket som helst koblingshus uten behov for å bli programmert på nytt. Dette gjør systemet svært fleksibelt med tanke på omstilling og introduksjon av nye produkter.



# Summary

Kongsberg Automotive Raufoss (KA) manufactures a wide range of pneumatic couplings used within truck, bus and trailer applications. For instance the vehicles break system. The criticality of this system requires KA's parts to be flawless. With an annual production of more than 100 million, most of the production is today fully automated. Nevertheless, a large group of low volume products are assembled in manual workstations. This naturally makes production costly, but the manual assembly also results in a higher rate of quality faults. Combined with an increased demand for customer specific products, it is apparent that KA should strive towards automated assembly of low volume products.

The scope of this thesis, is to create a flexible assembly cell that overcomes the challenges caused by small batch production, frequent turnovers, high quality demand and assembly of a diverse set of small components. A big effort have been done surveying earlier research done by KA, the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) and SINTEF. But also KA's current products and production systems. Combined with state of the art technology, this experience has been used to present a concept for a flexible assembly system. In addition, a more specific manufacturing cell was designed, and numerous different technical solutions have been discussed. In parallel with the design process, a simulations of the system and an economical anlysis of the proposed assembly cell have been carried out.

Unlike the current assembly system, that is divided with regard to the different coupling products, it is proposed to separate the flexible system in four process oriented assembly cells. This division makes it possible to achieve the necessary flexibility in combination with robust, quality-proof and efficient production.

Designing the flexible assembly cell also resulted in identifying localization, gripping and positioning of different coupling housings as a critical process. This procedure is therefore studied in detail, resulting in the developement of a generic robotic gripper that ensures correct orientation of the coupling housings. The gripper fingers were developed using topology optimization, and produced in stainless steel with an additive manufacturing system. Gripping couplings housings were also tested in combination with an industrial robot and a machine vision system using 3D-vision. A generic software was developed, so that the system can locate any coupling using point clouds and input from a CAD-model, without the need of re-programming.





# Innhold

Forord . . . . .	i
Sammendrag . . . . .	iii
Summary . . . . .	v
Figurliste . . . . .	xiii
Tabelliste . . . . .	xv
Akronymer og utvalgte ordforklaringer . . . . .	xvii
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Kongsberg Automotive Raufoss . . . . .	1
1.2 Bakgrunn for oppgaven . . . . .	2
1.3 Problemstilling . . . . .	2
1.4 Oppgavetekst . . . . .	3
1.5 Oppgavens struktur . . . . .	4
1.6 Litteratur . . . . .	5
<b>2 Teori</b>	<b>7</b>
2.1 Lean . . . . .	7
2.1.1 Lean-pyramiden . . . . .	8
2.1.2 Just-in-time – produktivitetsforbedring . . . . .	9
2.1.3 Jidoka – visualisering . . . . .	9
2.2 Automatisering . . . . .	10
2.2.1 Et lite tilbakeblikk . . . . .	10
2.2.2 Industri 4.0 – den fjerde industrielle revolusjon . . . . .	10
2.2.3 Design for montasje . . . . .	11
2.2.4 Fleksibel automatisert montasje . . . . .	12
2.2.5 En økonomisk modell for montasjesystemer . . . . .	14
2.3 Maskinsyn . . . . .	15
2.3.1 Bildebehandling . . . . .	15
2.3.2 3D-vision . . . . .	16
2.3.3 Generere 3D-data . . . . .	16
2.3.4 Kalibrering . . . . .	18
2.3.5 Bin-picking . . . . .	19
2.4 Robotikk i industrien . . . . .	19

2.4.1	Industrirobotens virkemåte . . . . .	20
2.4.2	Sikkerhet og samarbeidende roboter . . . . .	22
2.5	Erfaringsoverføring fra tidligere FoU-prosjekter . . . . .	22
2.5.1	KUPP – kundetilpassede produkter med samarbeidende autonome produksjonsceller . . . . .	23
2.5.2	Intervju med Sebastian Dransfeld . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Introduksjon av Kongsberg Automotive Raufoss</b>	<b>29</b>
3.1	Produkter . . . . .	29
3.1.1	Faguttrykk . . . . .	31
3.1.2	ABC Push-in family . . . . .	33
3.1.3	ABC Building Block System . . . . .	36
3.1.4	ABC Manifolds . . . . .	38
3.1.5	Tilleggsprodukter . . . . .	39
3.2	Produksjonsanlegg . . . . .	39
3.3	Montasjeavdelingen . . . . .	40
3.3.1	Rundbordmontasje . . . . .	40
3.3.2	Pallettmontasje . . . . .	41
3.3.3	Fremtidens høyvolumsautomater . . . . .	42
3.3.4	Robotisert manifoldmontasje . . . . .	43
3.3.5	Manuell montasje . . . . .	43
3.3.6	Materialflyt . . . . .	45
3.4	Økonomi . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Montasje hos Kongsberg Automotive Raufoss</b>	<b>47</b>
4.1	Monteringsbegrensninger . . . . .	47
4.2	Montasje av o-ringer . . . . .	48
4.3	Montasje av push-in-siden . . . . .	52
4.4	Montasje av portsider . . . . .	53
4.5	Manifoldmontasje . . . . .	53
4.6	Montasje av kontramuttere . . . . .	55
4.7	Viktige faktorer ved KA sine produkter og produksjon . . . . .	55
4.7.1	Produkter . . . . .	55
4.7.2	Produksjon . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Design av en lavvolum montasjecelle</b>	<b>59</b>
5.1	Praktiske kriterier og begrensninger . . . . .	59
5.1.1	Produktvarianter . . . . .	59
5.1.2	Fremtidens montasjekrav hos KA . . . . .	61
5.2	Designprinsipper . . . . .	62
5.3	Overordnet konseptdesign . . . . .	64

5.3.1	Konsept 1 – en generisk celle . . . . .	64
5.3.2	Konsept 2 – differensierte stasjoner . . . . .	65
5.3.3	Konsept 3 – sammenkoblede montasjeceller . . . . .	68
5.4	Vurdering av de ulike konseptene . . . . .	69
5.5	En montasjecelle for swiveler . . . . .	71
5.5.1	Design . . . . .	72
5.5.2	Deteksjon av koblingshus . . . . .	76
5.5.3	Materialflyt . . . . .	77
5.5.4	Montasjeprosessen . . . . .	79
5.5.5	Valg av industrirobot . . . . .	81
5.5.6	Kvalitetskontroll . . . . .	83
5.5.7	Software . . . . .	84
5.5.8	Alternative layout . . . . .	85
5.5.9	Et alternativt montasjesystem . . . . .	86
5.5.10	Simulering i Visual Components . . . . .	89
5.5.11	Økonomisk vurdering . . . . .	90
5.6	Oppsummering av designutviklingen . . . . .	94
5.6.1	Videre designutvikling av montasjecellen . . . . .	95
<b>6</b>	<b>Griperdesign</b>	<b>97</b>
6.1	Designprinsipper . . . . .	98
6.1.1	Utfordringer . . . . .	99
6.2	Designutvikling . . . . .	100
6.3	Griperkonsepter . . . . .	105
6.4	Griper for koblinger med swiveler . . . . .	107
<b>7</b>	<b>Praktisk testing</b>	<b>113</b>
7.1	Lokasjon og griping av koblingshus basert på CAD-input . . . . .	113
7.2	Utstyr . . . . .	113
7.3	Fremgangsmåte . . . . .	115
7.4	Resultater . . . . .	118
<b>8</b>	<b>Oppsummering</b>	<b>121</b>
8.1	Oppsummering av utført arbeid . . . . .	121
8.2	Oppsummering av resultater . . . . .	122
8.3	Videre arbeid . . . . .	123
	<b>Referanser</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Kildekode</b>	<b>131</b>
A.1	Lokalisering . . . . .	131
A.2	Hovedprogram . . . . .	132

<b>B</b>	<b>Diverse</b>	<b>135</b>
B.1	Supplerende illustrasjoner . . . . .	135
B.2	Ulike montasjesteg . . . . .	138
B.3	Produkter som monteres manuelt med swiveler . . . . .	140
B.4	Datablader . . . . .	141
B.5	Dimensjoner montasjecelle for swiveler . . . . .	143
<b>C</b>	<b>Digitale vedlegg</b>	<b>145</b>

# Figurliste

1.1	Ulike produkter fra Kongsberg Automotive Raufoss . . . . .	1
2.1	Lean-pyramiden . . . . .	9
2.2	Designprinsipper for automatisert montasje . . . . .	12
2.3	2D bildebehandling . . . . .	16
2.4	3D-vision . . . . .	17
2.5	Laser triangulation . . . . .	18
2.6	To typiske industriroboter . . . . .	20
2.7	En seksakserobot og tilhørende koordinatsystemer . . . . .	21
2.8	Komponenter benyttet i Dransfeld sine prosjekter . . . . .	26
3.1	Kobling fra BRK-serien . . . . .	30
3.2	Raufoss ABC System . . . . .	31
3.3	Ulike produkter i ABC Push-in familien . . . . .	33
3.4	Sammenstilling og bruk av ABC Push-in . . . . .	34
3.5	ABC Threadless . . . . .	35
3.6	Swivel i ulike størrelser . . . . .	35
3.7	Illustrasjon av en KARtridge-kobling . . . . .	36
3.8	KARtridge-portside i ulike størrelser . . . . .	36
3.9	En typisk sammenstilling av ABC Byggeklosser . . . . .	37
3.10	To spesielle varianter av ABC Swivel Bulkhead . . . . .	38
3.11	ABC Manifolds . . . . .	38
3.12	Tilleggsprodukter produsert av KA . . . . .	39
3.13	Fabrikkoversikt Kongsberg Automotive Raufoss . . . . .	39
3.14	Rundbordsautomat fra Tronrud for BRK-montasje . . . . .	41
3.15	Palettautomat levert av Mikron . . . . .	42
3.16	Nærbilde fra en Mikron palettautomat . . . . .	42
3.17	Montasjecelle for manifolder . . . . .	43
3.18	Manuell montasje hos KA . . . . .	44
3.19	Materialhåndtering hos KA . . . . .	45
4.1	En illustrasjon av KA sine ulike o-ringer . . . . .	48
4.2	Ohrmann sitt prinsipp for montasje av ytre o-ringer . . . . .	49

4.3	Manuell montasje av en ytre o-ring på en ABC New Line . . . . .	49
4.4	Automatisert rundbordmontasje av o-ringer . . . . .	50
4.5	Montasje av indre o-ringer . . . . .	51
4.6	Automatisert pallettmontasje av o-ringer . . . . .	51
4.7	Montasje av 16 mm Threadless i en Mikron pallettautomat . . . . .	52
4.8	Nærbilde av KARtridge-montasje med en pallett-maskin fra Mikron . . . . .	53
4.9	Layout manifoldmontasje . . . . .	54
4.10	Nærbilde av manifoldmontasje . . . . .	55
5.1	Ulike produktvarianter i New Line-serien . . . . .	60
5.2	Konsept med en generisk montasjecelle . . . . .	65
5.3	Konsept med differensierte stasjoner . . . . .	66
5.4	Videreført konseptskisse med differensierte stasjoner . . . . .	67
5.5	Konsept med sammenkoblede stasjoner . . . . .	69
5.6	Et tilfeldig utvalg koblinger fra KA med swiveler . . . . .	72
5.7	Illustrasjon av mulig montasjecelle for swiveler . . . . .	73
5.8	Oversikt over montasjecellen for swiveler . . . . .	73
5.9	Nærbilde av prosessen der koblingshuset lokaliseres og gripes . . . . .	74
5.10	Nærbilde av spesialmaskin for montasje . . . . .	74
5.11	Ulike potensielle visionsystemer . . . . .	76
5.12	Eksempler på kommersielle matesystemer . . . . .	78
5.13	Manuell påfylling av komponenter . . . . .	79
5.14	System for påføring av silikon . . . . .	80
5.15	Sikkerhetssone ved bruk av laserkannere . . . . .	82
5.16	Alternativ cellelayout 1 . . . . .	85
5.17	Alternativ cellelayout 2 . . . . .	86
5.18	Nærbilde av en alternativ montasjecelle for swiveler . . . . .	87
5.19	Oversiktsbilde av en alternativ montasjecelle for swiveler . . . . .	88
5.20	Skjermdump fra simulering i Visual Components . . . . .	89
5.21	Montasjekostnad per enhet ved ulike nedbetalingsperioder . . . . .	93
5.22	Montasjekostnad per enhet ved ulike syklustider . . . . .	93
6.1	Et utvalg koblinger med swiveler . . . . .	98
6.2	Eksempler på dårlig griperdesign . . . . .	99
6.3	Plassutfordringer ved utforming av gripersystemet . . . . .	100
6.4	Tre ulike griperprinsipper . . . . .	101
6.5	Figuren viser hvordan en vinkelgriper forskyver arbeidsstykkets senter . . . . .	101
6.6	Koblingens geometriske begrensninger . . . . .	102
6.7	Arbeidsstykkets frihetsgrader ved bruk av ulike griperfingre . . . . .	103
6.8	Sammenheng mellom antall fingre, fingerdesign og kontaktpunkter . . . . .	103
6.9	Figuren viser hvordan EOAT kan bestå av flere gripere . . . . .	104

6.10	Et verktøybyttesystem fra ATI . . . . .	104
6.11	Visualisering av konsept 1 . . . . .	105
6.12	Funksjonell prototype av konsept 2 . . . . .	106
6.13	Et utvalg innvendige griper . . . . .	107
6.14	Kontaktflater mellom griper og koblinger . . . . .	108
6.15	Vinkling av griper muliggjør betjening av montasjemaskinen . . . . .	109
6.16	Modell for topologioptimalisering . . . . .	110
6.17	Topologioptimalisering i Inspire . . . . .	110
6.18	Endelig griperdesign . . . . .	111
6.19	Sentrale egenskaper ved det endelige griperdesignet . . . . .	111
6.20	Produksjon av endelige griperfingre . . . . .	112
7.1	Laboppsett for testing av lokasjon og griping av koblingshus . . . . .	114
7.2	Systemets informasjonsflyt . . . . .	115
7.3	Ufiltrert punktsky av kobling liggende på et bord . . . . .	116
7.4	Punktsky av kobling. Bordet i figur 7.3 er filtrert vekk . . . . .	116
7.5	Match av CAD med punktsky fra et kamera . . . . .	117
7.6	Koblingens koordinatsystem i forhold til bordets z-akse . . . . .	118
7.7	Match av punktsky og CAD . . . . .	119
7.8	Skjermdump fra praktisk testing . . . . .	119
B.1	Montasje av ABC KArtridge i en Mikron-automat . . . . .	136
B.2	Griping av coneelementer i en Mikron-automat . . . . .	136
B.3	Griping av en gripering . . . . .	137
B.4	Rundbordmontasje av ytre o-ringer . . . . .	137
B.5	Datablad for Schunk KGG 80-30 . . . . .	141
B.6	Datablad for Fanuc sin LR Mate 200iD . . . . .	142
B.7	Dimensjoner montasjecelle for swiveler . . . . .	143





# Tabelliste

3.1	Omtrentlig kostnad per montasje . . . . .	46
5.1	Aktuelle 6-akse industriroboter . . . . .	82
5.2	Sammendrag av kostnadsberegning for foreslått montasjecelle . . . . .	90
5.3	Estimerte kostnader for en swivel-montasjecelle . . . . .	91
5.4	Tall benyttet for beregning av automatiserte montasjekostnader . . . . .	92
B.1	Oversikt over ulike produkter som monteres manuelt hos KA i dag . . . . .	140



## **Akronymer og utvalgte ordforklaringer**

**AGV** Automated Guided Vehicles

**ATS** Lokal vekstbedrift som monterer koblinger manuelt

**Blister** Dette er en beholder med et magasinsystem som sørger for nøyaktig plassering av komponenten

**CAD** Computer Aided Design

**DFA** Design For Assembly

**EBS** Electronic Brake System

**EOAT** End Of Arm Tooling

**JIT** Just-in-time

**TCP** Tool Center Point

**TPS** Toyote Production System

**WIP** Work In Progress



# Kapittel 1

## Introduksjon

### 1.1 Kongsberg Automotive Raufoss

Bildelprodusenten Kongsberg Automotive Raufoss (KA) er en del av konsernet Kongsberg Automotive som har hovedkontor på Kongsberg. Konsernets omsetning var i 2015 på 1 milliard euro. Avdelingen på Raufoss har over 230 ansatte og spesialiserer seg på trykkluftskoblinger for bremsesystemer levert under merkevarenavnet Raufoss Couplings. I figur 1.1 ser vi en typisk Raufoss Couplings-sammenstilling. Koblingene er satt sammen av flere mindre komponenter produsert i stål, messing og ulike typer plast.



Figur 1.1: Sprengillustrering av en typisk sammenstilling med ulike koblinger produsert av Kongsberg Automotive Raufoss

## 1.2 Bakgrunn for oppgaven

Samarbeidet med KA startet høsten 2016 i forbindelse med min prosjektoppgave der fokusområdet var additiv tilvirkning. Etter gode erfaringer med prosjektoppgaven var det ønsket fra begge parter å fortsette samarbeidet, men jeg ønsket å skifte tema for å fokusere på automasjon og robotikk. Mitt innspill til KA var å se på effektivisering og forbedring av utfordringer som flaskehals, manuelle arbeidsoppgaver, eller produksjonssteg med mye svinn eller nedetid. For å diskutere mulige oppgaver ble det etter initiativ fra Knut Sørby arrangert et møte 10. januar hvor også SINTEF var invitert. Både SINTEF, KA og NTNU er medlemmer av forskningssenteret «SFI Manufacturing» hvor ett av fokusområdene er robust og fleksibel automatisering. Det ble besluttet å knytte oppgaven mot SFI Manufacturing for å kunne dra nytte av eksisterende erfaring og kunnskap. Under møtet ble det klart at KA produserer over 200 produkter med spesialtilpasninger for hver kundes applikasjon, og som dermed har et for lavt totalvolum til at det lønner seg å automatisere produksjonen med det KA selv betegner som «tradisjonell KA-teknologi». Som et konkret eksempel ble koblingen 10 mm KArtridge benyttet. Koblingen har et årlig produksjonsvolum på 50 000 – 100 000 stykk, og produseres i dag manuelt. KA ønsket en masteroppgave som kunne studere hvordan produksjonen kan gjøres annerledes, og med større grad av fleksibel automatisering. Dette var utgangspunktet for oppgaveteksten som ble utviklet i løpet av januar 2017.

## 1.3 Problemstilling

KA sin viktigste salgskanal er kontrakter med store kjøretøysprodusenter, for eksempel Volvo. I en lastebil fra Volvo er tilnærmet alle trykkluftskoblingene produsert av KA, men ettersom hver enkelt lastebilprodusent har ulike krav til koblingene fører det til et behov for kundespesifikke produkter. Produksjonsvolum for slike produkter er typisk opp mot 100 000 stykk per år. Et slikt volum er per i dag ikke økonomisk forsvarlig å automatisere, og koblingene blir derfor montert manuelt eller utkontraktet til andre produksjonsselskaper. Isolert sett taper KA i dag penger på enkelte av de kundespesifikke «serviceproduktene», men plikter likevel å levere produktene ettersom de inngår i kontraktene. I tillegg ser KA at etterspørselen etter flere kundespesifikke produkter stadig øker. Å forbedre det økonomiske aspektet ved produksjon av disse produktene er et sentralt motivasjonsmoment.

Like viktig for KA er kvalitetssikring av de ferdige produktene. Størstedelen benyttes i kjøretøyenes bremsesystemer og koblingene er derfor kritiske komponenter. Svikter en del av bremsesystemet kan det i ytterste konsekvens føre til tap av liv. Det er derfor ekstremt viktig at alle komponentene er kvalitetssikret, og at ferdige produkter er uten feil. KA tar kvalitet på alvor og følger derfor en «triple 0»-strategi som har en målsetting om null ulykker, ingen miljøpåvirkninger og null forstyrrelser. I den automatiserte montasjen

er det i dag mange og gode kvalitetskontroller som sikrer produktets kvalitet, og KA har gode erfaringer med dette systemet. Den manuelle montasjen har derimot dårligere statistikk til tross for stort fokus på kvalitetssikring. Kvalitetskontrollen avhenger av arbeiderene, og det er umulig å unngå menneskelige feil. Den manglende kontrollen er et svært viktig faktor for i større grad å automatisere produksjonen.

**Oppsummert skal følgende problemer løses:**

- Høye manuelle montasjekostnader
- For dårlig kvalitetssikring i den manuelle montasjen
- Økende etterspørsel etter kundespesifikke produkter som i dag bare kan produseres manuelt

## 1.4 Oppgavetekst

KA har en visjon om at de i fremtiden har en fleksibel montasjecelle som kan montere «hva som helst». En universal, robust og fleksibel celle som ikke trenger omprogrammering for hvert nye produkt; men som i stedet forstår montasjestegene selv utifra CAD-modeller og kan håndtere alle typer komponenter.

Denne oppgaven skal skrives med KA sin visjon i tankene. I den forbindelse skal dagens produksjonsmetoder og montaseløsninger presenteres slik at de kan brukes på nytt i fremtidig videreføring av arbeidet. Dessuten skal tidligere erfaringer fra samarbeid mellom KA, SINTEF og NTNU undersøkes ved å se på resultater fra relaterte FoU-prosjekter. Videre skal det utvikles et system for automatisert montasje av koblingsdeler til bremssystem for tunge kjøretøy. Løsningen skal være robust og fleksibel. Flexibel i den forstand at omstilling til nye produkter går raskt og uten store investeringskostnader. Robust slik at løsningen kan benyttes i industrien og ikke bare fungerer i teorien. Systemet skal være tilpasset produksjon av produkter med årlig volum på 2 000 – 100 000 stykk. En økonomisk vurdering skal også gjennomføres. Ett eller flere konkrete produkt skal velges som kandidater for automatisert montasje, og det skal defineres elementer i montasjeprosessen som skal studeres spesielt. Det skal gjøres praktiske tester i laboratoriet for å utvikle og verifisere tekniske løsninger.

Oppsummert skal det gjøres følgende:

1. Undersøke relaterte FoU-prosjekter gjennomført ved NTNU og SINTEF
2. Gjennomgå og presentere dagens produksjon og produksjonsmetoder hos KA
3. Undersøke kommersielle systemer som kan løse KA sine utfordringer med manuell montasje

4. Foreslå et generelt design for en robust og fleksibel montasjecelle laget for produksjon av produkter med årlig volum på 2 000 til 100 000 stykk
5. Gjøre en økonomisk vurdering av den nye løsningen i forhold til dagens produksjonsmetoder hos KA
6. Utvikle en løsning på utvalgte tekniske utfordringer ved håndtering av ulike komponenter med store variasjoner. Løsningen skal testes i praksis

## 1.5 Oppgavens struktur

- Kapittel 1 presenterer bakgrunn for oppgaven og gir en introduksjon til Kongsberg Automotive Raufoss. I tillegg defineres oppgaveteksten
- Kapittel 2 presenterer et utvalg teori som er relevant for oppgavene som skal løses. I kapittel 2.5 presenteres dessuten erfaringer fra tidligere relevante prosjekter mellom KA, NTNU og SINTEF. Intervjuer og annen informasjonsinnhenting har vært sentralt for hvordan problemstillingen har blitt løst
- I kapittel 3 presenteres KA sine produkter og produksjon. Mye informasjon er hentet inn, og blir presentert i et komprimert format rettet mot leseren av oppgaven og mot KA sine fremtidige samarbeidspartnere. Det er viktig å forstå hvordan KA sine ulike produkter er montert, de ulike komponentene og hvordan det endelige produktet fungerer. Disse faktorene legger føringer for montasjecellens design
- Kapittel 4 er mer detaljert enn kapittel 3, og fokuserer på hvordan montasjeprosessen gjøres hos KA i dagens produksjon. KA har god kompetanse på dette området, og det er svært verdifullt å inkludere denne kunnskapen i det nye montasjesystemet. Viktige resultater fra informasjonsinnhenting er oppsummert i kapittel 4.7
- Kapittel 5 presenterer designkriterier og designprinsipper for den nye montasjecellen. Mulige overordnede konsepter presenteres og diskuteres blant annet i forhold til logistikk. I kapittel 5.5 fremstilles en mulig spesifikk montasjecelle; designet i SolidWorks. De ulike tekniske løsningene diskuteres, og det er dessuten gjennomført en økonomisk vurdering av den nye montasjecellen
- Som en del av oppgavens tekniske løsning designes det i kapittel 6 en ny robotgriper. Behovet for en gjennomtenkt og godt designet griper ble tydelig under designprosessen i kapittel 5. Gripersystemet spiller en viktig rolle, og er kritisk med tanke på robusthet og muligheten for å realisere montasjecellen



- I kapittel 7 presenteres praktiske tester av et system som lokaliserer og griper koblingshus ved hjelp av et vision- og robot-system. Programmet er modulært og benytter seg av en CAD-modell som input. Testene er utført i laboratoriet hos NTNU og SINTEF i Trondheim
- Kapittel 8 gir en oppsummering av resultatene fra arbeidet og presenterer tanker for videre arbeid

## 1.6 Litteratur

Et litteratursøk danner grunnlaget for den teoretiske delen av prosjektoppgaven; noe som gjør det mulig å gjennomføre resten av oppgaven på en god måte. Nødvendig litteratur er hentet fra sider som er tilgjengelig gjennom NTNU sitt Universitetsbibliotek (NTNU UB). Søking etter relevante fagtekster har foregått via NTNU UB sin søkemotor Oria i tillegg til Scopus og Science Direct. Fagbøkene ([Benhabib, 2003](#); [Monkman et al., 2007](#); [Boothroyd, 2005](#); [Womack and Jones, 2013](#)) har vært spesielt nyttige.

I forbindelse med erfaringsoverføring fra tidligere prosjekter er skrevet materiale ervervet direkte fra de involverte personene.



# Kapittel 2

## Oppgavens teoretiske grunnlag

### 2.1 Lean

«Lean manufacturing» er også kjent som «toyota production system» (TPS) blir på norsk oftest bare betegnet som «lean» eller «lean produksjon». Oversatt betyr lean «veltrimmet», eller «slank», og viser til en organisasjon uten overflødige deler. Prinsippet ble først utviklet etter andre verdenskrig av Taiichi Ohno mens han arbeidet for Toyota. I følge [Womack and Jones \(2013\)](#) er lean en produksjonsmetodikk som ønsker «å gjøre mer med mindre». Færre arbeidstimer, mindre utstyr og mindre arealbruk skal skape produkter med høyere verdi som er nærmere det forbrukeren *faktisk ønsker seg*. Det er et viktig poeng i lean at verdi bestemmes ut i fra hva *forbrukeren* ønsker.

Filosofien bak lean er enkelt sagt å fjerne alt som krever ressurser men ikke skaper verdi; sløsing «waste» skal elimineres. Oversatt til japansk er sløsing kjent som «muda». Eksempler på muda i produksjon er blant annet feilproduserte varer, transport, venting og ferdigvarer som ligger på lager. Taiichi Ohno oppsummerte 7 forskjellige typer sløsing:

1. Overproduksjon
2. Transport
3. Defekter
4. Urasjonell bearbeiding
5. Unødvendige bevegelser
6. Lagring
7. Venting

Det er viktig å huske at eksempelvis lagring, transport og venting er elementer som i praksis er umulig å fullstendig eliminere, men tanken bak lean er å jobbe mot en slik teoretisk perfekt verden. Basert på denne filosofien har det blitt utviklet konkrete verktøy og

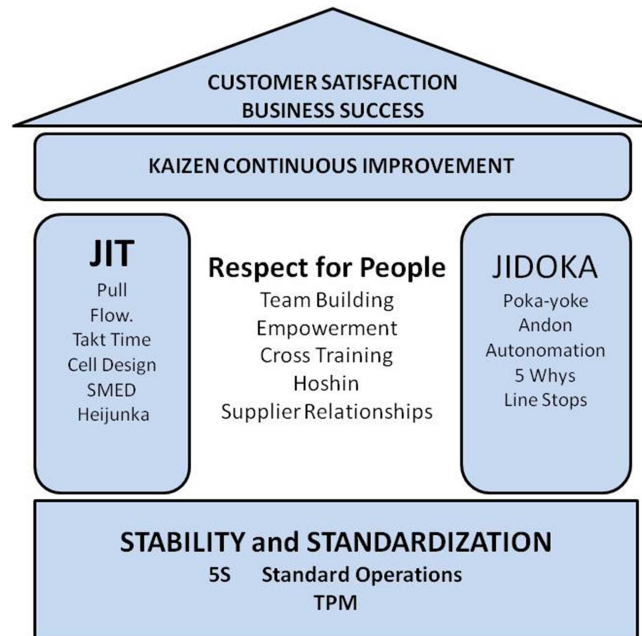
metoder for å «innføre lean»; de mest kjente er kanskje 5S og KANBAN-systemer (Niklas Modig and Pär Åhlström, 2014; Koren, 2010; Womack and Jones, 2013; Rolfsen, 2014).

### 2.1.1 Lean-pyramiden

Verktøy og systemer er vel og bra, men det viktigste med lean, er filosofien og tankesettet. Niklas Modig and Pär Åhlström (2014) beskriver et møte med en utenlandsk forsker og en leder i Toyota. Forskeren forteller at han forsker på bruk av lean i tjenestesektoren, og lurer på hvordan han kan anvende Toyota sine produksjonsverktøy i tjenestesektoren. Den japanske lederen forteller oppgitt hvordan forskeren ikke har forstått hva TPS handler om. Det viktigste er ikke de fysiske systemene og verktøyene, men det man ikke kan se med det blotte øyet; filosofien og verdiene som forklarer *hvorfor* verktøyene blir brukt. Lederen tegner opp en pyramide av sirkler og skriver «verdier» ved den øverste sirkelen. Den viktigste verdien for Toyota er å alltid fokusere på kunden og å tilfredsstille kundens behov. Verdiene er en kilde til å ta beslutninger og få veiledning, verdiene er kjernen. I to sirkler under «verdier» skriver lederen «just-in-time» (JIT) og «jidoka», dette er prinsippene. Prinsippene stammer fra å observere hvordan beslutninger som gjøres sammenfaller med verdiene. Toyota lærte at prinsippene kunne deles i to hovedgrupper. Just-in-time handler om å skape flyt slik at alle drar i den samme retningen for å fullføre målet. Jidoka er mindre abstrakt og handler om de grunnleggende forutsetningene, og om å ha oversikt over disse slik at man umiddelbart kan identifisere ting som hindrer flyten. Det er umulig å ha fullstendig kontroll over en organisasjon, men med jidoka visualiserer man organisasjonen slik at virksomheten blir transparent. Alle har oversikt og kan se om bedriften beveger seg i riktig retning eller ikke, og hvis det er avvik fra planen kan det gjøres tiltak umiddelbart. Lederen skriver nå «metoder» på sirkelene under «prinsipper». Metoder er standardiserte måter å utføre JIT og jidoka i praksis. Enkelte av metodene vises i søylene under JIT og jidoka i figur 2.1. lederen beveget seg til pyramidens nederste nivå og skrev nå «verktøy og aktiviteter». En metode består av en aktivitet og et verktøy; hva man gjør og med hva man gjør det med. Se figur 2.1 for en illustrasjon av hele pyramiden.

Poenget til lederen i historien over er at lean ikke er et ferdig sett med metoder og verktøy, men en strategi, tankesett og verdi som brukes for å nå det overordnede målet. I følge Niklas Modig and Pär Åhlström (2014) kan pyramiden oppsummeres slik:

- Verdier definerer organisasjonens *adferd*
- Prinsipper definerer organisasjonens *tankemåte*
- Metoder definerer organisasjonens *handlemåte*
- Verktøy definerer hva en organisasjon må *ha*



Figur 2.1: Lean-pyramiden. Hentet fra: <http://leanmanufacturingtools.org/>

### 2.1.2 Just-in-time – produktivitetsforbedring

Just-in-time (JIT) handler som sagt om *flyt*. I figur 2.1 er metoder som pull, flow, takt time, cell design, SMED og heijunka nevnt. Alle skal bidra til det Toyota (2017) beskriver som «Making only «what is needed, when it is needed, and in the amount needed»». Kundens ønske skal produseres når det er behov, uten at noe står på lager, og uten sløsing. Toyota skriver videre at kvalitetsprodukter skal produseres effektivt gjennom å eliminere sløsing. De produserer først kjøretøyet etter å ha fått ordenen fra kunden, og i produksjonen er bare et minimum av deler lagret før de settes sammen til et ferdig produkt. Et slikt «pull-system», som vil si at varen trekkes igjennom produksjonen ved at kunden først bestiller en bestemt bil, skiller seg fra masseproduksjon som først produserer til lager før varen selges. Pull-tankegangen er muligens det mest kjente aspektet med lean. KANBAN er et spesielt system for materialhåndtering som gjør det mulig å opprettholde pull-tankegangen. Systemet sørger for at bare de nødvendige komponentene er i produksjonen til rett tid og på rett sted.

### 2.1.3 Jidoka – visualisering

Toyota (2017) introduserer jidoka med utsagnet «kvalitet må bygges inn i produksjonsprosessen». Det de mener er at så fort en maskin gjør en feil, eller at et produkt har en defekt, så skal systemet oppdage og automatisk stoppe maskinen slik at feilen kan utbedres med én gang. Jidoka har blitt synonymt med kvalitet, kontinuerlig prosessovervåkning og løpende forbedringer. Dette passer sammen med filosofien om å eliminere sløsing; ved

å oppdage feilen med en gang unngår man muda i form av feilproduserte varer. Metoder å sikre jidoka er bruk av blant annet «poke-yoke» og «andon». Poke-yoke handler om å gjøre prosesser ufeilbare; eksempelvis at en komponent som skal monteres bare kan monteres på én måte, og det er den riktige måten. Andon fokuserer på å visualisere unormale hendelser i produksjonen.

## **2.2 Automatisering**

### **2.2.1 Et lite tilbakeblikk**

Tidligere professor ved NTNU, Terje Kristoffer Lien, skriver i [Lien \(2000\)](#) om «Robotmontasje i små serier». Montasje utgjør i følge Lien gjennomsnittlig 40% av arbeidsinnsatsen i industrien. Et tall som oppmuntrer til å øke automatiseringsgraden, men likevel er automatisert montasje lite utbredt som følge av høye krav til fleksibilitet. Når det er snakk om middels og små produksjonsvolumer blir systemene for dyre eller for lite fleksible til å håndtere flere ulike produkter. Noe av grunnen til systemenes høye kostnad er prisen for matere; de står i følge Lien for opp mot 80% av systemets total kostnad. Bruk av visionssystemer blir belyst som en mulig løsning for de dyre materene, og FANUC skal visstnok ha et system som muliggjør «bin-picking»; objekter som ligger uordnet i en beholder.

Det er interessant at det for 17 år siden fantes løsninger på eksempelvis bin-picking som i dag enda ikke benyttes i stor grad av den norske industrien. Det kan antas at grunnen er systemenes manglende stabilitet, nøyaktighet og robusthet; men med stadig bedre kvalitet på hardware i kombinasjon med fallende kostnader er det naturlig å tro på endringer i fremtiden. I tillegg skjer det stadig forbedringer innen software. Eksempelvis utvikling av brukevennlige programmer, grafisk programmering, kunstig intelligens og maskinlæring ([RIA, 2016](#)).

### **2.2.2 Industri 4.0 – den fjerde industrielle revolusjon**

Den første industrielle revolusjon var mekaniseringen som foregikk på 1800-tallet. Etter dette beregnes den andre revolusjonen som overgangen til elektrisitet som energikilde sammen med introduksjonen av masseproduksjon. I følge [Lasi et al. \(2014\)](#) er den avanserte digitaliseringen som har skjedd den tredje revolusjonen, og nå arbeides det mot en fjerde revolusjon: «industri 4.0». Industri 4.0 er de nye «smarte» metodene som har kommet som følge av store fremskritt innen software og IT. Produksjonssystemene skal bli modulære og mer fleksible samtidig som effekten skal økes. Målet skal nås med automatisert skreddersøm «mass customization». Idealisert kan industri 4.0 visualiseres i produksjonsøyemed som en helautomatisert produksjonslinje der hver stasjon selv forstår hvilke operasjoner som skal utføres utifra hvilke komponenter som ankommer stasjonen. I tillegg snakker de ulike systemene sammen ved hjelp av ny kommunikasjonsteknologi.

Begrepet industri 4.0 er laget av de tyske styresmaktene som ønsket et fokus på mulighetene som ligger i ny IT-teknologi, men det er viktig å nevne at også markedet etter spør en endring. Industri 4.0 bringer:

- Kortere utviklingstider med produksjon som raskt kan settes i gang
- Individualisering når dette er ønsket. Markedet endres fra selgers til kjøpers marked der kjøperen definerer produktet
- Bedre utnyttelse av ressursene ved hjelp av smartere løsninger

(Lasi et al., 2014; GTAI, 2017)

### Hjemflagging

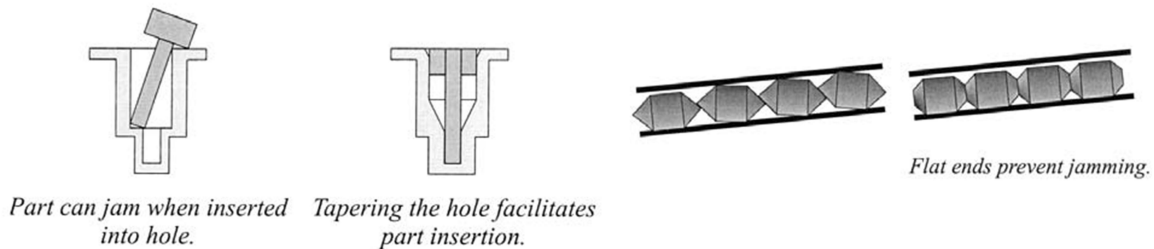
Etter flere tiår med utflagging av produksjon til lavkostland er den norske industrien i endring. Nye krav til kundetilpasninger, leveringstid og kvalitet gjør det kostbart å legge produksjonen langt unna markedet, og trenden er nå å flytte produksjonen «hjem». Automatisering er det som gjør dette mulig, og automatiseringsprosessene blir stadig bedre som følge av blant annet industri 4.0, fleksible roboter og nye styresystemer. Slik bør det også være skal man konkurrere med lavkostland som Kina (TU, 2016a,b; E24, 2016; Rosvold, 2016).

### 2.2.3 Design for montasje

Å designe produktet for produksjon er sentralt i flere ulike produksjonsprosesser, men det er kanskje spesielt viktig i montasjeprosesser. «Design for assembly» (DFA) ble for alvor gjort kjent i løpet av 1980-tallet gjennom litteratur fra G. Boothroyd og P. Dewhurst. DFA kan føre til store kostnadsgevinster ved manuell montasje, men ved automatisert montasje kan DFA være et krav for å være i stand til i hele tatt å utføre montasjen. Et enkelt eksempel er å orientere komponenter med en liten grad av symmetri. I manuell montasje er ikke dette et problem, men i den automatiserte produksjonen må det mest sannsynlig installeres et kostbart sensorsystem. Boothroyd (2005) uttaler at en av de største fordelene med DFA er at bedriften tvinges til å optimere produktdesignet, og gevinsten av dette kan til og med overgå effekten av automatisert montasje.

Boothroyd (2005) forteller videre at ved automatisert montasje kan en si at «hvis en komponent kan håndteres automatisk, så kan den vanligvis monteres med et automatisert system». Det vil si at automatisert montasje i stor grad handler om å håndtere og orientere komponentene som skal monteres. Å designe komponentene for transport og orientering innebærer å lage komponenter som er symmetriske, ikke hefter seg sammen, overlapper, er for store eller små for matesystemene, som lett skader seg, setter seg fast, eller er fleksible. Et eksempel på komponentdesign som motvirker stopp under transport vises til høyre i figur 2.2. Den mest åpenbare regelen med tanke på design for selve

sammenføyningsprosessen er å redusere antall nødvendige komponenter. Det er også positivt å forenkle komponentene, og innføre slippede kanter, eller en geometri som kan guide komponentene slik at de havner på riktig plass, og ikke kiler seg fast. Et eksempel er skruer med oval eller konisk tupp, eller designet vist til venstre i figur 2.2 (Beno Benhabib, 2003; Boothroyd, 2005).



Figur 2.2: Designprinsipper for automatisert montasje. Figuren er hentet fra (Beno Benhabib, 2003)

#### 2.2.4 Fleksibel automatisert montasje

Som nevnt fører ny teknologi, globalisering, skiftende markeder og sterk konkurranse til økt etterspørsel etter automatisert skreddersøm, og kundespesifikke produkter. For produksjonsbedrifter blir evnen til å respondere på markedsendringene særs viktig. Flere paradigmer har blitt utviklet for å takle denne utfordringen. Blant annet smidig-, tilpassningsdyktig-, fleksibel-, og omstillbar produksjon. Fellesnevneren for de ulike uttrykkene er *evnen til å endre produksjonen på en effektiv og god måte* (ElMaraghy, 2009).

Quinn et al. (1997) definerer smidig produksjon som en egenskap der montasjesystemet raskt kan bytte fra å produsere ett produkt til å lage et annet. Omstillingen må dessuten kreve minimalt av verktøybytter og programmering, og dessuten krever et smidig produksjonssystem at nye produkter enkelt skal kunne introduseres. Wiendahl et al. (2007) kommenterer at fleksibel produksjon tradisjonelt har blitt sett på et system der produksjonen kan endres uten å måtte endre konfigurasjonen. Omstillbarhet har derimot blitt tolket som et systems evne til å rekonfigureres. Wiendahl et al. (2007) mener istedenfor at «changeability», eller evnen til å endre, er en bedre betegnelse på systemer som tidlig kan endre produksjonen på hvilken som helst måte for å takle nye økonomiske impulser. «Evnen til å endre» fremstår å beskrive en fleksibel montasjecelles karakteristikk på en god, men generell måte. Abele and Wörn (2009) viser derimot til ulike spesifikke elementer som inngår i et fleksibelt produksjonssystem:

- *Prosessfleksibilitet* beskriver evnen til å installere ulike produksjonsteknologier
- *Sviktfleksibilitet* viser til produksjonssystemets evne til å takle stans og svikt i systemet. Egenskapen kan måles direkte som maskinproduktivitet



- *Volumfleksibilitet* er relatert til produksjonssystemets mulighet til å operere økonomisk gunstig ved ulike produksjonsvolum
- *Utvidelsesfleksibilitet* sikter til utvidelseskapasiteten
- *Produktfleksibilitet* er evnen til å endre produksjonssystemet for å produsere nye produkter på en økonomisk gunstig måte

## Hardware

Generelt er bedriftens ansatte mer tilpasningsdyktige til endring enn maskiner og mekanisk utstyr, og grad av fleksibilitet vil i stor grad begrenses av utstyrets egenskaper. Hardwaren som benyttes må derfor være fleksibel og kunne benyttes til å produsere flere ulike produkter, og bruken muliggjøres ved robust og generisk software. Eksempler på fleksibelt utstyr er blant annet «quick-change» verktøybyttesystemer, modulære arbeidsbord, og fleksible matesystemer (Quinn et al., 1997).

## Software

Ta utgangspunkt i et produksjonssystem sammensatt av hardware klassifisert som fleksibelt; eksempelvis en industrirobot, fleksible matere og et verktøybyttesystem. Systemet kan i realiteten ikke defineres som fleksibelt med mindre kontrollsystemet er laget på en fleksibel måte. Fleksibiliteten som ønskes er som kjent «evnen til å utføre endringer, helst uten å måtte endre konfigurasjonen»; dette er en egenskap som *software* i stor grad sørger for, og programmeringsdelen av et fleksibelt produksjonssystem må ikke undervurderes (Quinn et al., 1997).

Parnas (1972) skriver om modularisering som en mekanisme som «forbedrer fleksibiliteten og forståelsen av et softwaresystem samtidig som utviklingstiden reduseres». Måten en deler inn modulene har mye å si for hvordan systemet presterer. Typisk begynner utviklingen med et flytskjema, og moduler lages på bakgrunn av dette. Parnas (1972) mener derimot at systemet bør designes på bakgrunn av en liste med utfordrende designbeslutninger, eller beslutninger som sannsynligvis endres. Deretter designes de ulike modulene for å forsøke å skjule beslutningene fra de andre modulene. Målet er blant annet å utvikle et system med moduler som arbeider helt individuelt, uten å påvirkes av det som foregår internt i de resterende modulene.

## Holonic Manufacturing

Holonic Manufacturing System (HMS) er en metode å kontrollere automatiserte produksjonssystemet der grunntanken er å gjøre kontrollsystemet distribuert og modulært. Koestler (1967) innfører begrepet «holon» som noe som er en del av helt system parallelt med å være en egen enhet. Begrepet kan sees på som en sverm, eller eksempelvis termitter; hver termitt er ett eget individ, men de arbeider sammen mot et felles mål. I

produksjonssystemer vil det si at de ulike elementene har individuelle programmer som arbeider mot hverandre, men de blir ikke styrt av et felles hovedprogram. De ulike holonene arbeider mot input, og gir selv ut output som de andre holonene benytter. Et konkret eksempel er at et visionsystem i en montasjecelle styres av et eget holon. Roboten styres av et annet holon, og vision-holonet vil gi ut posisjonen til en lokalisert del om robot-holonen spør etter denne posisjonen. Programmene er separert, og koden er skjult for de ulike modulene. Det fører blant annet til økt robusthet ettersom de ulike holonene arbeider individuelt utifra lokal input, og ikke fra en overordnet styringsenhet. Av samme grunn er det dessuten enklere å skifte og endre deler av systemet. For eksempel kan et nytt visionsystem enkelt benyttes så lenge det gir ut koordinater til robot-holonet (Leeuwen and Norrie, 1997; Roulet-Dubonnet and Ystgaard, 2011).

### 2.2.5 En økonomisk modell for montasjesystemer

Lien (2000) beskriver en enkel og generell modell for å vurdere lønnsomheten av et automatisert montasjesystem i forhold til manuell montasje. Modellen er som følger:

$$K_e = \frac{N_s \times I}{T_t \times V_p} + \frac{L \times B}{P_a} \quad (2.1)$$

Der  $K_e$  er montasjekostnad per produserte enhet,  $N_s$  er antall montasjeceller som behøves for å montere årlig volum,  $I$  er totale investeringer per system,  $T_t$  er tilbakebetalingstid i antall år,  $V_p$  er årlig produksjonsvolum,  $L$  er lønnskostnad per time,  $B$  er andel tid systemet betjenes og  $P_a$  er produksjonsvolum per time for det automatiserte systemet. Modellen benytter dessuten følgende forutsetninger:

- Montasjesystemet har 0 verdi etter tilbakebetalingstidens utløp
- Det automatiserte systemet består av en industrirobot med nødvendig utstyr. Det benyttes én mater per komponent
- Komponentene monteres i rekkefølge
- Etterfylt av deler gjøres manuelt
- Det benyttes flat avskrivning uten rentekostnader

En sammenligning kan gjøres med manuell montasje ved å beregne manuell montasje på følgende måte:

$$K_m = \frac{L}{P_m} \quad (2.2)$$

Der  $K_m$  er montasjekostnad per produserte enhet,  $L$  er lønnskostnader per time og  $P_m$  er produksjonsvolum per time. Modellen antar lønn som den eneste kostnaden, og utelater dermed utstyrs-kostnader.

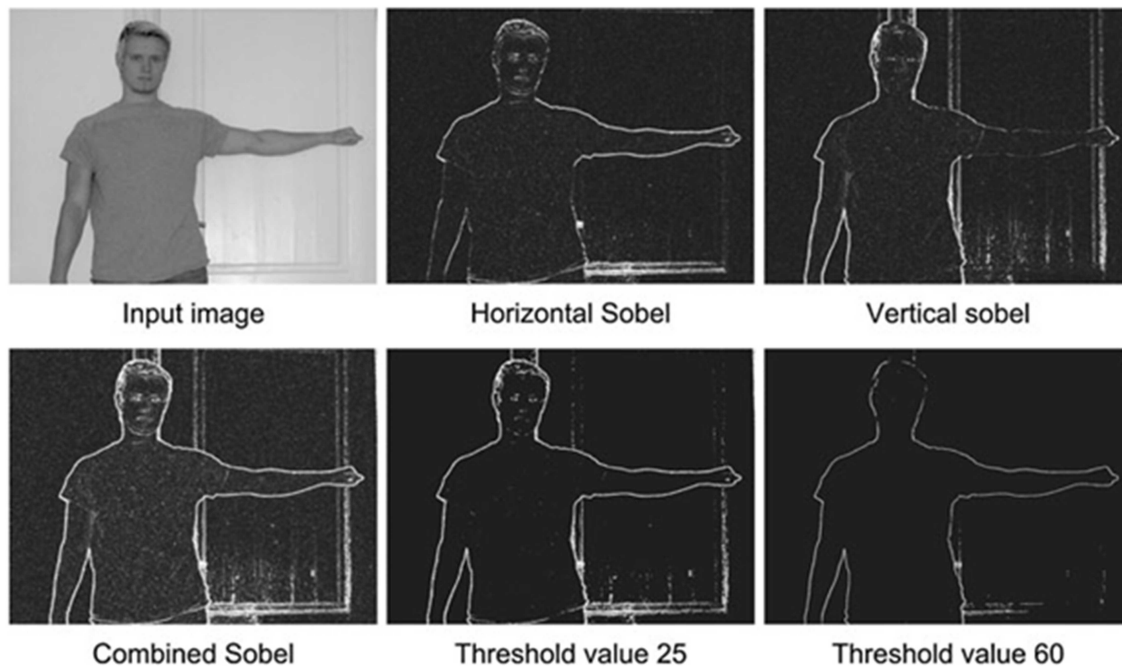
## 2.3 Maskinsyn

Maskinsyn, «Machine vision» eller den mer generiske termen «vision» er et multidisiplinært fagområde som blant annet tar i bruk teknologi fra fagfelt som optikk, elektronikk, informasjonsteknologi og kunstig intelligens. Allerede i 1950-årene begynte utviklingen av visionsystemer; det har resultert i et stort fagfelt som i dag brukes i mange sammenhenger. Et utvalg er analyse av blodceller, trafikkovervåkning, GIS og GIT, objektgjenkjenning, identifisering, kvalitetsinspisering og styring av automatiserte prosesser. Det er vanlig å betegne maskinsyn som vision rettet mot industrielt bruk, den mer generelle termen «computer vision» omfatter alt som har med bildebehandling. I denne oppgaven er fokuset naturlig nok rettet mot maskinsyn, men ofte brukes bare betegnelsen «vision». Vision i industrien skiller seg fra standard bildebehandling ved at prosessen ofte foregår i strengt regulerte miljøer. Lyssetting og bakgrunn er kontrollert for å sikre prosessens robusthet. Det er ofte svært få produkter som er involvert i hvert bilde, og objekter og deres størrelse er kjent og definert på forhånd. Det typiske er 2D-syn med rene svart-hvitt-bilder der bestemte trekk «features» blir gjenkjent; for eksempel o-ringer i form av en sirkel. Det er enda ikke produsert gode generelle systemer som virkelig kan etterligne menneskelig syn. I industrielt bruk kan det i hovedsak skiller mellom visuell inspeksjon og robotsyn. Førstnevnte er generelt enklere enn sistnevnte. Det kommer av at et inspeksjonsområde ofte er enklere å kontrollere enn et område der deler skal lokaliseres og håndteres (Vernon, 1991).

### 2.3.1 Bildebehandling

Et kamerasystem består av en optisk linse som bryter, og eksempelvis fokuserer lyset. For å ta et digitalt bilde må lyset registreres av en sensor; typisk brukes en CCD- eller CMOS-sensor. Sensorene har en viss oppløsning som også bestemmer bildeoppløsningen; antall piksler. For hver piksel vil lysintensitet og eventuelle farger bli representert med tall. I et 8-bit gråtonebilde vil gråtonen for hvert eneste piksel bestemmes av et tall fra 0 til 255; 0 vil være fullstendig svart mens 255 er hvitt. Bildet er altså en matrise av tall som definerer intensitet, og dette kan brukes til å gjøre matematiske operasjoner. Typiske operasjoner er filtrering for å fjerne støy, «thresholding» for å stenge ute visse intensitetsnivåer, «edge detection» som detekterer kanter som oppstår der det er stor endring i intensitet, og «blob detection» som går ut på å gjenkjenne områder med en bestemt sammensetning av piksler. Operasjonene må gjøres med algoritmer som søker igjennom bildet for å finne områder som stemmer med gitte kriterier. I figur 2.3 vises bruk av først en edge detector kalt «Sobel-filter» som oppdager kanter som følge av endring i intensitet. I de siste bildene blir thresholding brukt for å fjerne uønskede kanter. Til tross for dette er ikke konturen av mennesket perfekt, og i tillegg har det blitt med enkelte kanter fra døren i bakgrunnen. Figuren er et godt eksempel på hvor sårbar et visionsystem kan være for støy og uryddige miljøer (Vernon, 1991; Wikipedia, 2017b; Fisher et al., 2013; Forsyth and Ponce,

2015; William, 2017).



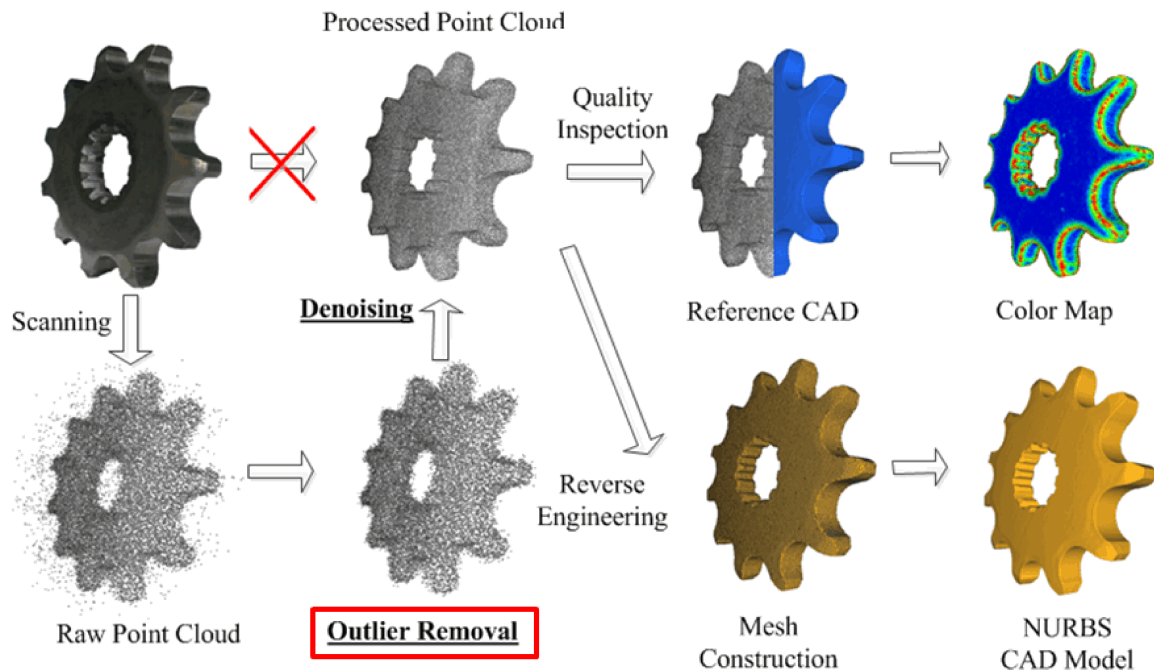
Figur 2.3: Figuren viser hvordan edge detection algoritmen kalt «Sobel-filter» oppdager kanter. Thresholding fjerner støy. Figuren er hentet fra [http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2012/07/tmp26dc163\\_thumb22.png](http://what-when-how.com/wp-content/uploads/2012/07/tmp26dc163_thumb22.png)

### 2.3.2 3D-vision

Et vanlig bilde er en todimensjonal representasjon av en tredimensjonal verden. For å kunne hente tredimensjonale data må det kombineres flere bilder (stereo-vision), eller bruke andre metoder som «structured light» eller lasertriangulering. informasjonen kan blant annet brukes til å lage punktskyer. Som navnet tilsier er det en «sky» av punkter, og punktene er tilknyttet et bestemt punkt i et tredimensjonalt koordinatsystem. Det originale bildet har ofte mange punkter som ikke er av interesse, såkalte «outliers». Slik støy må i noen tilfeller filtreres vekk og det interessante området bearbeides før det kan brukes videre. Punktskydataen kan så sammenlignes med CAD-data slik at orientering og eventuelle forskjeller kan beregnes. I figur 2.4 vises arbeidsprosessen fra skanning og frem til sammenligning mot CADc og generering av en ny CAD-fil (Fisher et al., 2013; William, 2017).

### 2.3.3 Generere 3D-data

Som nevnt er det flere ulike måter å skaffe seg dybdeinformasjon i tillegg til standard 2D-data. Den klassiske metoden er stereo-vision; det blir et slags dybdesyn slik som det menneskelige øyet. Tradisjonelt stereo-syn benytter seg av to like kameraer som er



Figur 2.4: Figuren viser 3D-skanning og sammenligning av en CAD-modell for et tannhjul. Figuren er hentet fra: <https://taylorwang.files.wordpress.com/2013/02/pipeline.png>

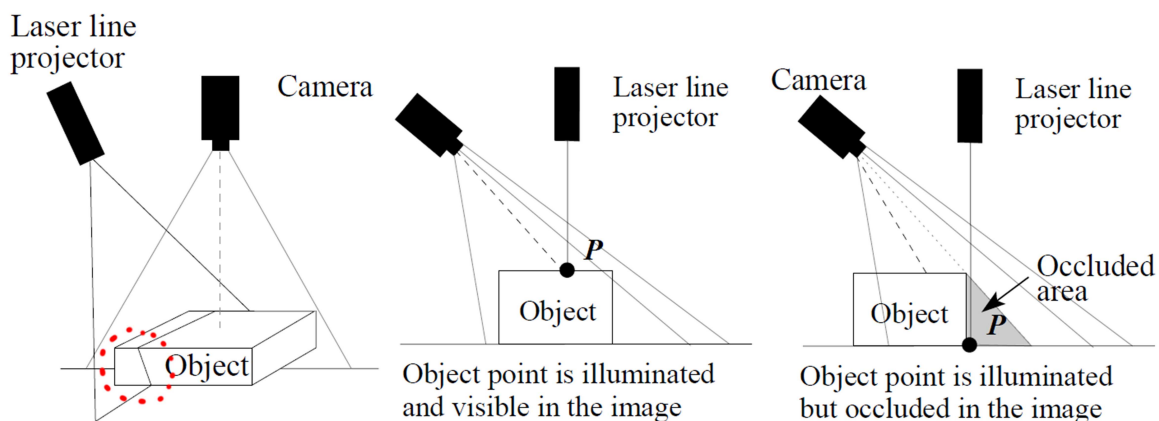
plassert med en viss avstand og vinkel i forhold til hverandre, men det finnes også systemer som bruker flere kameraer. Det er også mulig å ta mange bilder med det samme kameraet ved flere ulike posisjoner for å skaffe 3D-data. Felles er at systemet må utføre en grundig kalibrering, og utfordringen med å finne igjen det samme punktet i de forskjellige bildene må løses. Et stereo-system har dessuten utfordringer som følge av dybdeeffekten; et punkt synlig for det ene kameraet kan være skjult for det andre som følge av at kameraene har ulike posisjoner. Dybdeeffekten illustreres i figur 2.5 med lasertriangulering, og det skjulte området betegnes som et «occluded area».

Andre metoder bruker en ekstern sensor for å innhente dybdeinformasjon i tillegg til 2D-informasjon. «Time of flight» er en metode som sender ut lys i en bestemt bølgelengde og måler tiden det tar før lyset reflekteres tilbake. Lyshastigheten er som kjent konstant, og avstanden kan beregnes ut ifra dette. Utregningen er enkel, noe som gjør det mulig å oppnå høy bildefrekvens. Det har blitt utviklet flere tekniske løsninger som bygger på samme prinsipp. Metoden kan brukes over lange avstander, men har dessverre ikke spesielt høy nøyaktighet. Skal systemet oppnå en nøyaktighet på cm-nivå må elektronikken oppdage forsinkelser i størrelsesordenen 100 picosekunder. Microsoft Kinect V2 er et kjent 3D-kamera som benytter seg av en time of flight sensor

«Structured light» eller «strukturert lys» krever en projektor som prosjekterer en spesiell gitterstruktur og et kamera som tar bilder. Gitterstrukturen har et kjent mønster, og når mønsteret treffer et tredimensjonalt objekt vil mønsteret brytes. Kameraet registrer scenen og kan regne ut dybde data som følge av mønsterets brytninger. En posi-

tiv ting med dette systemet er at sensorer og projektor i seg selv er enkle komponenter, men beregningene er omfattende. Det fører til at det er vanskelig å få høy bildefrekvens. Strukturert lys kan også bli påvirket av miljøet det brukes i, blant annet andre lyskilder og refleksjoner. Det nyutviklede 3D-kameraet Zivid benytter strukturert lys, og i følge [TU \(2016c\)](#) brukes en rekke ulike mønstre og bølgelengder slik at systemet også fungerer på reflekserive overflater. Zivid oppnår en nøyaktighet på 0,1 mm.

«Sheet of light», «lasertriangulering» eller «laser line profiling» er en metode som minner om strukturert lys; men istedenfor å prosjektere et mønster sender en laser ut én laserlinje. Skal et helt objekt registreres må linjen bevege seg over objektet, eller at objektet beveger seg under skannelinjen. Et kamera registrerer hvordan linjen deformeres som følge av objektets tredimensjonale struktur. Triangulering benyttes for å omforme deformasjonen som registreres av kameraet til objektets dybde. Lasertriangulering illustreres i figur 2.5, legg spesielt merke til hvordan linjen brytes over objektet helt til venstre i figuren. Området er markert med en rød ring. Lasertriangulering er nøyaktig ned mot en tiendels mm, men har kort rekkevidde. Metoden er rask og passer godt til å overvåke en produksjonslinje i fart ([Fisher et al., 2013](#); [Kadambi et al., 2014](#); [MVTec, 2015](#); [LMI Technologies, 2015](#); [Wikipedia, 2017a](#)).



Figur 2.5: Figur fra ([MVTec, 2015](#)) som illustrerer laser triangulation

### 2.3.4 Kalibrering

En viktig del av alle vision-systemer er kalibrering. Pikkelkoordinater som identifiseres i et bilde er i en industriell sammenheng som oftest ikke nyttige så lenge koordinatene ikke transformeres til eksempelvis robotens koordinatsystem. For kalibrering av 2D-kameraer er det nødvendig å finne både de indre, og ytre parameterene. Indre parametere er kameraets senter, brennvidde og linseforvrengning. Ytre parametere er kameraets orientering og posisjon i forhold til et annet absolutt koordinatsystem. Ved bruk av 3D-kameraer er det bare de ytre parameterene som må bestemmes.

«Hand-eye calibration» er en annen velkjent kalibreringsprosedyre som må gjøres når kameraet ikke er fastmontert, eksempelvis at kameraet er festet til en robotarm. Da er

forholdet mellom kameraet «øyet» og roboten «hånd» ukjent, og denne transformasjonen må avdekkes. Derav navnet hand-eye calibration. (Kadambi et al., 2014; MVTec, 2015; Fisher et al., 2013; William, 2017; Horaud and Dornaika, 1995)

### 2.3.5 Bin-picking

Å kunne plukke usorterte komponenter lagret i bulk med roboter er en problemstilling som det har blitt arbeidet lenge med (Lien, 2000). Søker en etter systemer for bin-picking vil det i dag dukke opp løsninger fra kjente merker som Fanuc og Sick, men også fra mindre oppstartsfirmaer som «Pick-it» fra Belgia. Etter å ha vært i kontakt med sistnevnte kom det frem at de for 12500 EUR leverer et ferdigkalibrert system med egen software og kamera som lett skal kunne settes opp for nye produkter. Spørsmålet er hvor godt systemet fungerer, og hvordan det kan arbeide i en industriell setting ved siden av andre systemer. Dessuten er problemet i seg selv utrolig utfordrende; å plukke komponenter med helt tilfeldig orientering, potensiell overlapping og mulig uegnede geometrier (RIA, 2016).

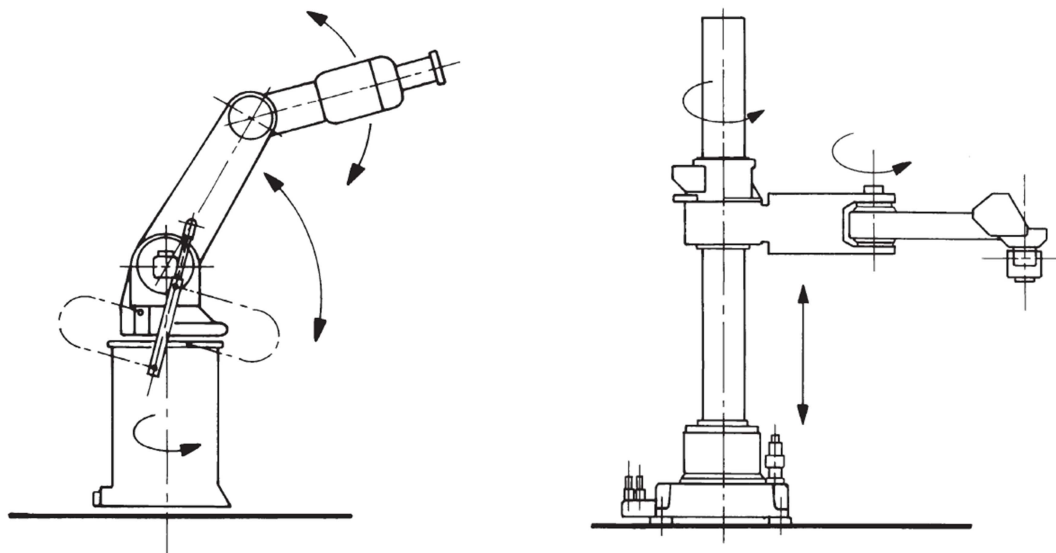
Robot Worx (2017) skriver i en artikkel at problemet «bin-picking» består av tre hovedkomponenter som må arbeide sammen: sensorikk, software og EOAT (End Of Arm Tooling). EOAT vil si det verktøyet som monteres ytterst på robotens arm. Det kan være en sveisepistol, griper eller andre spesialtilpassede verktøy. Software er i denne sammenhengen programmene som styrer de ulike komponentene, og algoritmene som detekterer komponenter som kan gripes. Sensorene som skaffer nødvendig informasjon er blant annet kamerasystemer og kraftsensorer. For at hele systemet skal fungere må at alle de tre hovedkomponentene arbeide godt sammen.

## 2.4 Robotikk i industrien

Isostandarden ISO (2012) definerer en industriell robot som en «automatically controlled, reprogrammable, multipurpose manipulator, programmable in three or more axes, which can be either fixed in place or mobile for use in industrial automation applications». Dette inkluderer i følge standarden en manipulator med aktuatorer til å bevege leddene, men også en kontrolleringsenhet med «teach pendant» og nødvendig kommunikasjonssinterface. En teach pendant er et håndholdt enhet som lar brukeren kontrollere og programmere roboten. For at en industrirobot skal utføre en meningsfull oppgave behøves dessuten «end of arm tooling» (EOAT) eller «end effector». En EOAT er typisk en griper eller sveisepistol som monteres ytterst på robotens arm. Roboten behøver ofte også annet utstyr slik som sensorer og fiksturer (ISO, 2012; Gupta et al., 2016).

I figur 2.6 vises skisser av to mye brukte roboter innen industrien. Roboten i figur 2.6a er antropomorf, og har tre komponenter som er linket sammen med roterende ledd; noe som gir menneskelignende kinematikk. Roboten i figuren har tre akser som tilsvarer tre

frihetsgrader, men det mest vanlige i dag er å ha seks ledd slik at roboten får seks frihetsgrader. I figur 2.6b vises en SCARA-robot. Det er en enklere type robot som er mindre fleksibel, men svært rask. Den arbeider typisk med oppgaver der deler skal plukkes og flyttes, såkalt «pick and place» (Gupta et al., 2016; ISO, 2012).



(a) En typisk industrirobot med tre eller flere rotasjonsledd

(b) illustrasjon av en SCARA-robot

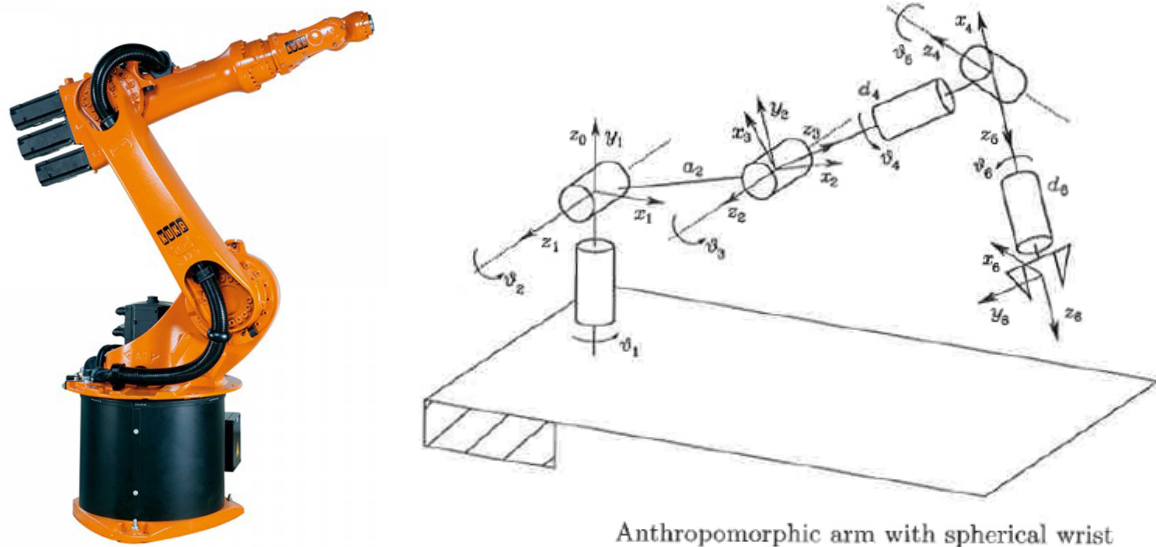
Figur 2.6: To typiske industriroboter. Figur er hentet fra (ISO, 2012)

### 2.4.1 Industrirobotens virkemåte

Både hydraulikk, trykkluft og elektromotorer kan brukes som aktuatorer for å bevege robotens ledd, men i dagens industriroboter brukes i all hovedsak elmotorer. Motorene kan monteres inne i leddene, men ofte er de montert så langt «bak» på armen som mulig, og med innvendige kraftoverføringer. Sistnevnte vises tydelig i figur 2.7a der tre svarte elmotorer er montert på robotens skulderledd. Dette er for å få minst mulig vekt ytterst på robotarmen slik at roboten yter best mulig med tanke på styrke, akselerasjon og stabilitet. Dette er viktige faktorer som bør vurderes når nye oppgaver skal utføres med roboter; «roboter ser forskjellig ut siden de kan brukes til mange forskjellige oppgaver» uttaler sjef for materialhåndtering i Fanuc (RIA and Bennet, 2013). Et annet viktig designmoment er hvordan de ulike rotasjonsleddene er plassert i forhold til hverandre. Plasseringen bestemmer hvordan roboten kan bevege seg, og hvordan kinematikken beregnes. En skisse av de ulike koordinatsystemene til en seksakserobot vises i figur 2.7b. For å beregne robotarmens posisjon må rotasjonsmatrisen og lokasjonen transformeres fra robotens basesystem, igjennom alle koordinatsystemene og helt frem til armens ytterste koordinatsystem. Når roboten får en instruks om å bevege seg til en bestemt posisjon må den inverse kinematikken beregnes for å finne ønskede grader i hvert enkelt ledd. På



grunn av det mekaniske systemet og unøyaktigheter i robotens egen kalibrering vil industriroboter alltid være mindre presise når det kommer til å bevege seg absolutt. Å repetere tidligere posisjoner kan derimot gjøres med høyere nøyaktighet, og det er den repetérbare nøyaktigheten robotprodusentene vanligvis oppgir. Grunnen er at en bestemt posisjon kan lagres som et sett av vinkler i robotens ulike motorer, og moterene er svært nøyaktige. Skal posisjonen regnes ut for å utføre absolutte bevegelser vil det derimot bli unøyaktig som følge av beregningene som må utføres (Gupta et al., 2016; Khatib, 2017).



(a) En seksakserrobot fra Kuka. (b) Figuren viser de seks koordinatsystemene til en typisk seksakserrobot. Bildet er hentet fra <https://www.robots.com/media/KR16.jpg> <http://blog.robotiq.com/hubfs/AgWOM.png>

Figur 2.7: En seksakserrobot og tilhørende koordinatsystemer

## Singulariteter

En singularitet er innenfor matematikk et punkt som ikke kan defineres matematisk. Industriroboter har også singulariteter; det er områder der roboten ikke kan gjøre bestemte bevegelser, eller oppfører seg unormalt. Det kan for eksempel være at robotens ledd er strukket ut maksimalt slik at de ytterste leddene er på linje. Som en illustrasjon på singulariteter kan en tenke seg et menneske som skal bevege hendene *samlet* opp over hodet og ned «bak ryggen»; da må hele kroppen roteres 180 ° når hendene peker rett opp siden skulderleddene har nådd sitt maksimale utslag. Området over hodet kan betraktes som en singularitet, og for å bevege hendene gjennom området må menneskets kropp gjøre et brått utslag på hele 180 grader. Singulariteter påvirker prosesser der roboter skal arbeide, og det er nødvendig å ha kjennskap til problemet i designfasen. For eksempel er sveispistoler ofte designet slik at pistolen er vinklet med 5–15 grader i forhold til robotarmen; det er for å redusere sannsynligheten for å støte på singulariteter. Å introdusere små vinkler mellom robot og arbeidsomgivelsene kan fungere i flere sammenhenger. En

annen måte å unngå problemet er å la roboten bare arbeide i områder der det ikke finnes singulariteter, men å klare dette i praksis er i de fleste tilfeller vanskelig (Hayes et al., 2002; Wikipedia, 2017c; Gupta et al., 2016; Khatib, 2017).

## 2.4.2 Sikkerhet og samarbeidende roboter

Ved bruk av industriroboter er sikkerhet et svært viktig element; ingen vil ha en flere hundre kilos robotarm som beveger seg ukontrollert. Sikkerhetsaspektet gjenspeiles både i hvordan kontrollenheten er laget med tanke på pålitelighet, og hvordan de fleste av dagens industriroboter må arbeide innenfor sikkerhetsgjerder.

En trend innen utviklingen av industrielle roboter er «samarbeidene roboter». Det er roboter som på ulike måter kan samarbeide med mennesker på en sikker måte. Eksempelvis la seg programmere av å bli ledet igjennom arbeidsstegene, eller at visse områder overvåkes slik at roboten stopper om noe skulle bevege seg inn i dette området. Det nyeste og mest aktuelle er derimot samarbeidene roboter som arbeider direkte med mennesker uten noe form for sikkerhetsbarrierer. Dette gjøres ved at roboten er utstyrt med sensorer og software som sørger for at den stanser med en gang den støter mot noe. Leddene har dessuten støtdemping og er uten klemfare. Prisen for en slik robot blir høyere enn standard industriroboter, men det finnes flere fordeler. Blant annet bruker samarbeidende roboter mindre areal siden sikkerhetsgjerder ikke er nødvendig, og det går raskt å inkludere roboten i allerede eksisterende produksjon. Til tross for at samarbeidende roboter med interne sensorer kan arbeide uten noen form ekstern sensorikk må hastigheten justeres ned for at roboten skal kunne stanse i tide. Dette er en viktig faktor som lett glemmes når nye produksjonssystemer designes. (RIA and Bennet, 2013; Gupta et al., 2016; Mathieu, 2015; Fanuc, 2017b; Tanya, 2016).

## 2.5 Erfaringsoverføring fra tidligere FoU-prosjekter

### Felles prosjekter med KA, NTNU og SINTEF

I løpet av de 15 siste årene har KA deltatt i flere prosjekter med både NTNU og SINTEF. Deriblant P2005, ESKOMP, MultiMat, NextForm, Kompositt i koblinger og KUPP. Hoveddelene av prosjektene har vært rettet mot produktutvikling, og da spesielt bruk av kompositt og utvikling av sprøytetøpeteknikker. Mer relevant for temaet i denne oppgaven er «Kompositt i koblinger» og KUPP; begge prosjektene tar for seg automatisert montasje av kundetilpassede produkter og produkter med lave produksjonsvolum. Erfaringer fra prosjektene presenteres i kapittel 2.5.1 og 2.5.2.

## 2.5.1 KUPP – kundetilpassede produkter med samarbeidende autonome produksjonsceller

*Fakta som presenteres i dette kapitlet er i hovedsak basert på KUPP-prosjektet sin sluttrapport fra 02.08.2013, men også fra samtaler med involverte personer hos SINTEF og publiserte artikler.*

I følge sluttrapporten fra 2013 har KUPP-prosjektet hatt som målsetning «å utvikle nye metoder for fleksibel automatisering for produksjon av lav- og mellomvolumprodukter gjennom å utvikle ny kunnskap om «mass customisation». Et tema som passer godt sammen med denne oppgavens tema. «Mass customisation» er på norsk kjent som «automatisert skreddersøm», det vil si automatisert produksjon som kan levere produkter med stor grad av individualitet. Prosjektet var et samarbeid mellom SINTEF, KA og Sandvik Teeness (ST). Begge bedriftene hedde allerede en høy automatiseringsgrad, men samtidig utfordringer knyttet til produkter med små og mellomstore volum. Prosjektet skulle bidra med å løse disse utfordringene ved å ta i bruk «state-of-the-art modulært produksjonsutstyr, sensorikk og prosessstyringsmetoder». Sentralt i prosjektet står dessuten utvikling av distribuert styring av autonome produksjonsceller for å oppnå fleksibilitet.

Rapporten konkluderer med at prosjektet har hatt god måloppnåelse. Både ST og KA bygget nye montasjeceller på bakgrunn av arbeidet gjort i prosjektet. Investeringskostnaden kunne forsvares, og rapporten forteller at fleksibiliteten er god. Systemene er basert på bruk av industriroboter, og benytter vision og kraftsensorer for å sikre tilstrekkelig robusthet. God overvåkning sørger også for 0-feil og selvkorrigerende tiltak øker produktiviteten. Den endelige montasjecellen bygget hos KA introduseres i kapittel 3.3.4, og utfører montasje av KAtridgekoblinger i ulike manifolder.

### Nyttige erfaringer fra KUPP

De mest relevante erfaringene fra KUPP-rapporten i forhold til masteroppgaven er listet opp.

- I rapporten kan en lese at «når et montasjesystem skal designes, er det en forutsetning å vite hvilke produkter som skal monteres i cella samt typiske seriestørrelser, årsvolumer og krav til kapasitet, hvilket definerer krav til takttider». Gode rammer er åpenbart viktig ved design av montasjesystemer
- Prosjektet kvalitetssikret løsningen ved å bruke mye tid på testing i laboratoriet på Raufoss. KA kjørte dessuten tidligfaseproduksjon i laboratoriet. For KA blir det mindre risiko i investeringsfasen når det finnes god dokumentasjon på at systemet allerede fungerer
- Det defineres at treskiftsproduksjon hos KA har tilgjengelig 3780 timer per år. Det ble satt mål om å klare komponenthåndtering på 3 sekunder i gjennomsnitt

- Fra 8 ulike konsept av KA-cellen ble det valgt en løsning med 2 samarbeidende roboter. Denne løsningen ble vurdert som mer fleksibel og med lavere kostnad, men også med lavere kapasitetsutnyttelse enn roboter i serie
- For KA-cellen skulle 4 ulike hus monteres sammen med 7 ulike komponenter. Det var nødvendig med 4 griperer for hus, 2 griperer for komponenter og 2 griperer for blisterhåndtering. Færrest mulig ulike griperer var ønsket, og dette førte til mer generelle griperer med dårligere sentreringsegenskaper. Problemet ble løst med god visionkalibrering
- For KA var bruken av DFA, eller DFAA «Design for Automated Assembly» et meget viktig moment for å nå prosjektets målsetting. Med DFAA inkluderes kravene til fleksibel og automatisert montasje i produktutviklingsprosessen. Det ble i starten av prosjektet definert 10 produktvarianter som montasjesystemet skulle håndtere. Åtte av disse ble endret i tråd med DFAA for å forenkle montasjeprosessen
- Flere ulike produkter førte til et krav om generelle griperer for å redusere antall verktøyskift. De generelle griperene hadde ikke tilstrekkelige sentreringsegenskaper, og tilstrekkelig nøyaktighet ble sikret ved hjelp av visionsystemet. Et system som dessuten krevde god kalibrering
- Utfordringer med visionsystemet var i hovedsak knyttet til varierende lysforhold
- Simuleringer og kostnads kalkyler viste at to samarbeidende roboter har høyere grad av fleksibilitet, men dårligere kapasitetsutnyttelse enn to roboter i serie. For KA ble løsningen med samarbeidende roboter valgt
- KUPP identifiserte to elementer som kritiske for å realisere en god løsning på produktfleksibilitet:
  1. Det er nødvendig med en god programmeringsteknisk løsning som legger til rette for å utvide montasjecellen med nye produkter
  2. Roboter er notorisk unøyaktige, og spesielt om griperens unøyaktighet inkluderes. Montasjeprosessen hos KA krevde en nøyaktighet på  $\pm 0,2$  mm, men en slik nøyaktighet var ikke oppnåelig uten å justere posisjonering av de to robotene ved hjelp av kraftmålinger. Det måtte gjøres individuelle justeringer for de ulike produktene
- De største utfordringene for ST sin celle var riktig funksjon for et palett-matesystem, utvikling av robotgriper og å utvikle en stabil vision-løsning. Det ble brukt mye tid på forskning og utvikling av sistnevnte, men sluttresultatet ble likevel å benytte standard programvare fra Tordivel. Erfaringen fra dette er at smartere «enklere» løsninger for materialtransport kunne vært en bedre løsning, og kommersielle vision-systemer kunne blitt brukt i motsetning til å «finne opp kruttet på nytt»

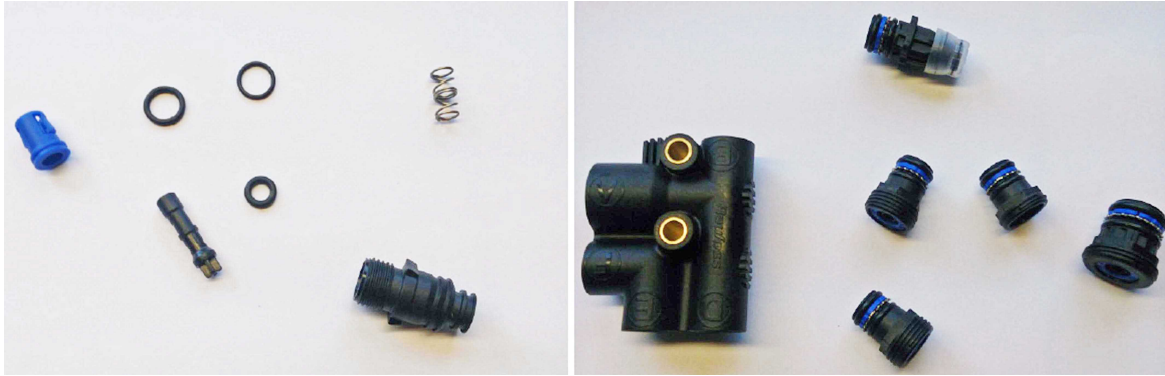
- Det ble utviklet flere ulike konsept for layout av ST sin montasjecelle. De kompakte cellene som forsøkte å minimere arealbruk ble ikke valgt. Bruk av flere roboter ble også vraket til fordel for et automatisert verktøybyttesystem, og de mer utprøvde Kuka-robotene ble valgt til fordel for en ny type samarbeidende UR lettveksroboter

## 2.5.2 Intervju med Sebastian Dransfeld

Informasjonen presentert i kapittel 2.5.1 er i stor grad basert på skrevet materiale. For å få en dypere forståelse av utfordringer og egenskaper ved en fleksibel montasjecelle er det gjennomført et intervju med Sebastian Dransfeld. Dransfeld var ferdig med sin doktorgrad «Measurement and Supervision in Automated Production» ved NTNU i 2007. I dag arbeider han som forsker hos Sintef Raufoss Manufacturing (SRM) med fokus på robotikk, maskinsyn og matematisk modellering (Dransfeld, 2007). Helt fra 2003 har Dransfeld vært involvert i prosjekter med KA, og besitter i dag en unik kunnskap og erfaring om automatisert montasje av KA sine produkter. Intervjuet ble utført 27. februar 2017, og det ble gjort lydopptak for å kvalitetssikre resultatene.

### Introduksjon

Sebastian Dransfeld ble først introdusert for trykkluftskoblinger som stipendiat i prosjektet «P2005». Han fortsatte arbeidet med koblinger i doktorgradsarbeidet som startet i 2003. Doktorgraden fokuserte på måling og overvåking av automatisert produksjon, og testene som Dransfeld gjorde var montasje av KA sine koblinger. Fokuset på montasje fortsatte i prosjektet «kompositt i koblinger». KA hadde akkurat utviklet sine nye komposittkoblinger, og dette prosjektet skulle se på hvordan komposittkoblinger kunne produseres automatisert; og da spesielt med fokus på det Dransfeld beskriver som «odde varianter». Det vil si spesielle produkter som ofte produseres i mindre volum; en årlig produksjon fra fem hundre til én million produkter. Det ble bygget en montasjecelle for å montere koblingen «Test Point Plug». Det er en relativt kompleks kobling som gjør det mulig å koble på utstyr og teste trykkluftssystemet. De ulike komponentene vises til venstre i figur 2.8. Resultatet fra labarbeidet viste at datidens løsninger ikke var gode nok til å takle kravene som var satt. Dransfeld forteller at de klarte å montere koblingen, men systemets kvalitet og oppetid var for dårlig. Montasjeprosessen var rett og slett ikke stabil nok. På slutten av prosjektet kom det derimot inn en forespørsel om å se på automatisert manifoldmontasje; det vil si at flere ferdige KAtridgekoblinger skal monteres i manifolder. Denne prosessen hadde større toleranser, og komponentene var større. Det gjorde montasjecellen mer realiserbar, og KUPP-prosjektet ble en suksess. Komponentene som inngår i KUPP-montasjen vises til høyre i figur 2.8 .



Figur 2.8: Figuren til venstre viser komponentene som skulle monteres i «kompositt i koblinger» mens bildet til høyre viser komponentene i prosjektet KUPP. Bildene er hentet fra en SFI Norman presentasjon

### Helhetstenking

En svært viktig erfaring fra de tidligere prosjektene er i følge Dransfeld at det fokuseres for mye på ett bestemt problem uten å se det i sammenheng med resten av systemet. Det brukes ofte svært mye ressurser på å klare én oppgave perfekt, men når løsningen skal integreres med resten av systemet må det som oftest gjøres endringer. Det er unødvendig arbeid, og man burde derimot forsøke å se helheten og forstå de ulike elementene som skal arbeide sammen. Et konkret eksempel er bruken av maskinsyn i kretskortmontasje. I stedet for å tenke at «vi skal gripe delen perfekt», eller «vi skal lokalisere perfekt», så gripes deler blindt fra et matesystem og deretter sjekkes det hvordan komponenten er grepet. Til slutt blir plasseringen justert og så monteres delen. I dette systemet er ikke vision-system og griping separate enheter, men en del av hele montasjeprosessen der sluttresultatet blir svært nøyaktig.

### Nøyaktighet og robusthet

Som nevnt klarte forskerne i prosjektet «kompositt i koblinger» å utføre de nødvendige montasjestegene, men kravet til hastighet og oppetid ble ikke tilfredsstillt. I en montasje-prosessen er den største utfordringen i følge Dransfeld å oppfylle kravet om at en viss operasjon skal utføres med 100% sikkerhet *hver eneste gang*. For en typisk montasje-operasjon inkluderer det at komponenten skal lokaliseres, gripes, plasseres riktig, og at systemet må *vite med sikkerhet* at delen er riktig plassert. Når dette i tillegg skal gjøres på så kort tid at en egentlig ikke har tilstrekkelig tid til å utføre kontroll av prosessen så blir det utfordrende.

Utfordringen er dessuten forankret i rene fysiske lover. Eksempelvis vil en robotarm som beveger seg raskt for deretter å bråstoppe, skape vibrasjoner som ikke forsvinner før en bestemt mengde tid har passert. Et fleksibelt montagesystem består dessuten av elementer som jobber sammen, eksempelvis en robot, maskinsyn og kraftsensorer; men for hvert ledd som arbeider sammen vil usikkerheten øke. For å montere KA sine produkter

med tilstrekkelig nøyaktighet må en i følge Dransfeld benytte seg av gode kalibreringsmetoder og systemer som justerer for unøyaktigheter. Kostnaden av å benytte slike løsninger er at prosessen bruker lengre tid.

## **Gjenbruk**

Dransfeld mener et problem med mye av utviklingen som gjøres er at det fokuseres for mye på en spesifikk problemstilling, for eksempel montasje av én spesiell kobling. Løsningene som utvikles er laget bare for å brukes på montasjecellen som utvikles nå, og ikke med tanke på fremtidige behov. En kan overdrive og si at alle KA sine montasjeprosesser er grunnleggende like; ulike deler skal gripes og klemmes sammen på et koblingshus. Hver gang en ny montasjecelle skal lages burde det i følge Dransfeld finnes standard løsninger som kan settes sammen til en ny celle slik at en ikke må starte på «bar bakke». Et konkret eksempel er prosessen med å lokalisere og gripe komponenter ved hjelp av et vision-system. Det kunne vært en standardisert oppgave. Å ha en langsiktig tankegang blir ekstra krevende når produksjonsbedriftene benytter eksterne selskaper som Tronrud eller Intek for å utforme og bygge montasjecellene. Systemintegratorene har naturlig nok andre motivasjonsfaktorer enn kunder som KA.

## **Programmering**

Dransfeld mener forståelsen for programmering er for dårlig blant de som designer systemene, og mye på grunn av at software ikke er direkte «synlig». Et mekanisk system er svært håndfast og lett å forstå, men tidsbruk og verdien som ligger bak programmeringen vises ikke på samme måte. Verdien av gode program og forståelse for hvordan programmering virker sammen med systemet er noe som burde tydeliggjøres. Dransfeld mener dessuten at det er store muligheter for gjenbruk innen programmeringsfaget, eksempelvis med lokalisering og griping. Montasje av produkter med forskjellig form kan gjerne programmeres på en lik måte, så lenge programmeringen gjøres på en smart måte. For eksempel benytte et vision-system og en fleksibel robot til å plukke ulike deler. Det bør være mulig å benytte det samme programmet til å plukke geometrisk ulike komponenter, det eneste som behøver å endres er filen som brukes som input; eksempelvis en CAD-fil av delen som skal plukkes.

## **Hva er økonomisk lønnsomt**

Økonomi er naturlig nok en avgjørende faktor ved design av automatiserte produksjonsprosesser, men Dransfeld mener at fokuset på lav syklustid og innkjøpskostnader kan få negative konsekvenser, spesielt for fleksible systemer. Det er enkelt å ta utgangspunkt i at syklustiden skal være to sekunder, og at de billigste komponentene skal velges; men resultatet kan bli høyere installasjons- og omstillingskostnader, og lavere oppetid. Å spare på innkjøpsbudsjettet kan føre til store fremtidige driftskostnader, og cellens *egentlige*

kostnad blir langt høyere enn planlagt, men dette er vanskeligere å beregne. Dransfeld mener det er viktig å se verdien i standardiserte systemer som bedriften selv forstår og kan vedlikeholde om noe går galt. I motsetning til å kjøpe det billigste systemet hver gang noe nytt bygges, og til slutt ha et stort antall ulike teknologier.

Dransfeld mener at for montasjeceller som skal produsere lavere volum kan det vise seg at en høyere takttid er akseptabelt, bare systemet fungerer, og leverer høy kvalitet og høy oppetid. For fleksible celler som skal produsere et stort antall ulike komponenter er det dessuten viktig å se på tiden som brukes for å designe og bygge systemet. Hva er kostnaden av å benytte flere hundre timer på å perfektionere en prosess som bare skal produsere 2000 komponenter årlig, og hvor selve produksjonstiden kanskje bare er et titalls timer. Ved disse produksjonstallene kan en ikke ha et ensidig fokus på å oppnå en lav syklustid.



# Kapittel 3

## Introduksjon av Kongsberg Automotive Raufoss

I dette kapitlet presenteres KA sine ulike produkter, viktige faguttrykk og produksjonslokaler. Montasjeavdelingen er spesielt viktig for denne oppgaven og blir følgelig belyst i større detalj enn øvrige produksjonsavdelinger.

*Fakta og tall presentert i dette kapitlet er basert på KA sine egne presentasjoner, men også samtaler og mailkorrespondanse med Henning Rud, Thor Thorstad, Svein Erik Evjen og Mona Haugnes. De er ansatte hos KA og arbeider henholdsvis med utvikling, montasje, økonomi og produksjonsplanlegging. Figurer uten referanse er fra KA sine presentasjoner, eller egne bilder. Som følge av at KA er i en omstrukturingsprosess kan enkelte ting ha endret seg etter at dette kapitlet ble skrevet i februar 2017.*

*Se kapittel 1 for generell bakgrunnsinformasjon om KA.*

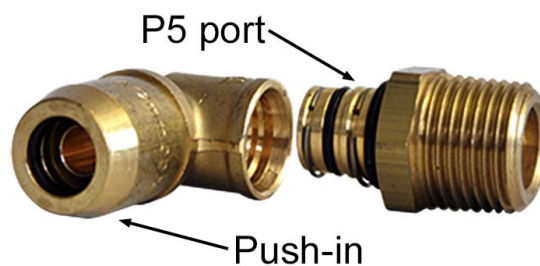
KA produserer i dag trykkluftskoblinger ved sin fabrikk på Raufoss. Årlig produseres omtrent 100 millioner ferdige produkter fordelt på 925 forskjellige artikler. KA kjøper inn råstoff av plast og messing som støpes og maskineres til blant annet koblingshus, griperinger og andre komponenter som inngår i de ferdige koblingene. Bare o-ringer og stjerneskiver i stål kjøpes ferdigprodusert. Hoveddelen av montasjen foregår på Raufoss, men noe utkontrakteres til de lokale vekstbedriftene ATS Gjøvik/Toten AS og Sølve AS, eller produseres av KA i Polen og Kina.

### 3.1 Produkter

KA har et vidt spekter av produkter som brukes i trykkluftsanlegg til kjøretøy. Det innebærer byggeblokker som kan fordele luftstrømmen, 90-graders vinkler og ulike overganger, testpunkter, plugg, adaptere, braketter, slangenippler og ulike koblinger.

## Raufoss BRK Couplings

KA sitt eldste koblingssystem heter BRK og står for «bremsørskobling». Dette systemet består utelukkende av messingkoblinger med o-ringer for tetning. For kobling av rør benytter BRK i hovedsak en push-in-løsning, men leverer også standard «fir-tree» slangenipler. KA har dessuten en egen «plug-in» løsning for enkelt å koble sammen koblingene sine. Systemet heter P5, og plug-in-porten fungerer på den måten at to låseringer i stål sørger for at koblingen sitter fast samtidig som den kan roteres. Funksjonaliteten vises i figur 3.1. BRK-systemet kom først i 1985 og blir av KA betegnet som «gammeldags» med tunge komponenter i messing. De ønsker derfor å avslutte produksjonen av BRK-koblinger til fordel for ABC-systemet. Å gjøre en fullstendig utfasing av BRK er både utfordrende og tidkrevende ettersom enkelte sluttbrukere fortsatt ønsker det gamle systemet. Dessuten har KA krav om å levere produkter til ettermarkedet.



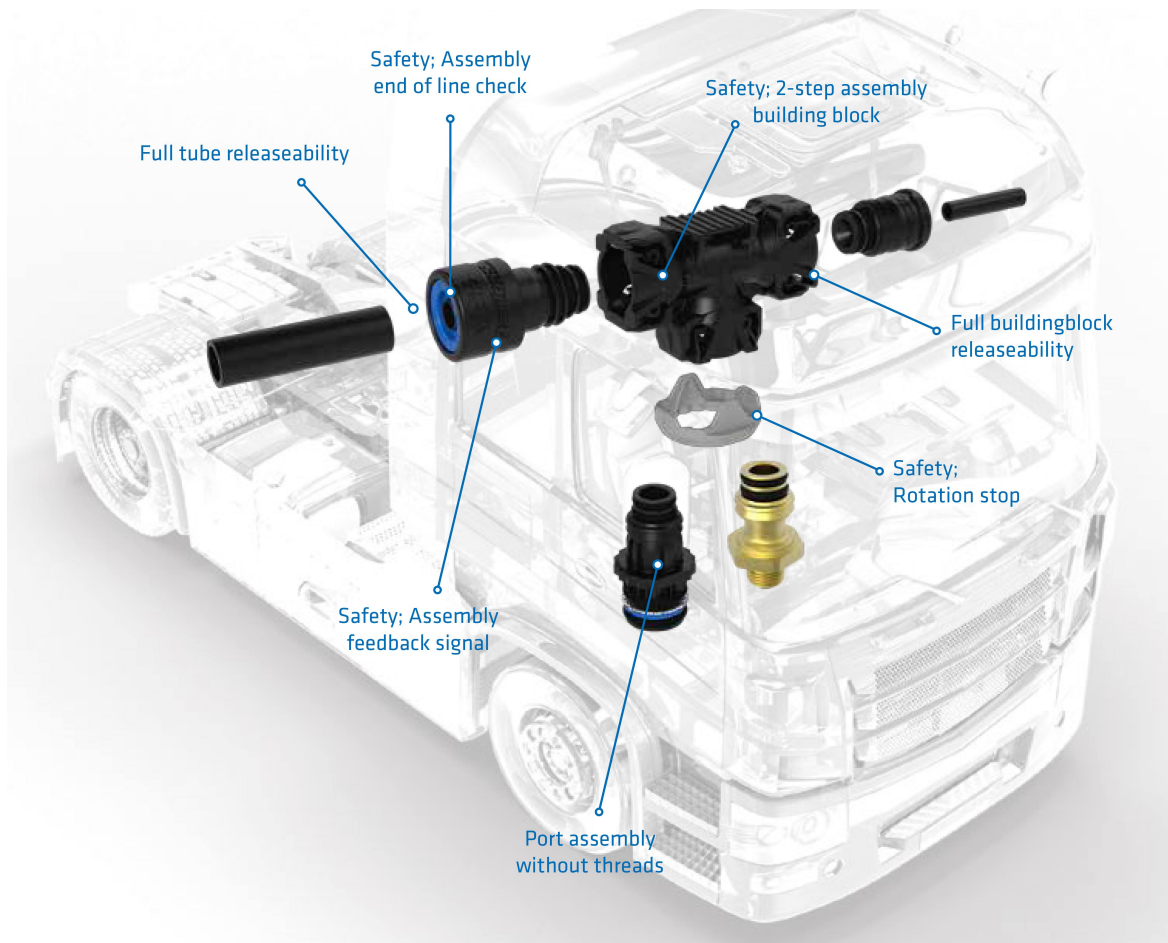
Figur 3.1: Figuren viser produkter fra KA sin BRK-serie; til venstre en 90-graders kobling med push-in side, og koblingen til høyre er en swivel med P5 portside. Bildet er hentet fra <http://www.fbh.ch/home/>

## Raufoss ABC System

KA sitt nye koblingssystemet heter «Raufoss ABC System». ABC står for «air brake coupling», men det er ikke tilfeldig at ABC også gir assosiasjoner til moduler og byggeblokker; modulæritet er nemlig essensielt i ABC-systemet. Den største forskjellen fra BRK er bruk av komposittmaterialer slik som plasttypen PA12 med innslag av glassfiber. Dette sørger for en betydelig vektreduksjon uten å måtte ta kvalitetskompromisser. I enkelte tilfeller har vektreduksjonen vært på hele 80%. Vekt er naturlig nok et viktig moment i transportbransjen. Til tross for KA sitt fokus på bruk av komposittmaterialer brukes det av kvalitetshensyn fortsatt messing i gjengeforbindelser. ABC-systemet kan deles i tre hovedgrupper:

- ABC Push-in Family
- ABC Building Block System
- ABC Manifolds

En byggeblokk vises sentralt i figur 3.2 mens de resterende koblingene er en del av push-in familien. Figuren illustrerer dessuten viktige funksjonaliteter som enkel gjengeløs mon-  
 tasje, demonteringsmuligheter og sikkerhetsfunksjoner. Den korte videoen <https://www.youtube.com/watch?v=R5h1VeWiSac> gir en svært god presentasjon av hvordan ABC-systemet fungerer i praksis.



Figur 3.2: Raufoss ABC System (KA, 2016a)

### 3.1.1 Faguttrykk

*Noen av uttrykkene skrives på engelsk fordi det er det engelske uttrykket som blir brukt i dagligtale hos KA.*

- **Push-in-side:** den siden av koblingen der rør kan monteres ved hjelp av push-in-funksjonaliteten
- **Portside:** er motsatt ende av koblingens push-in side. Portsiden monteres typisk i en byggeblokk eller manifold
- **Push-in:** er et system der slanger monteres til koblinger ved å presse slangen inn i koblingen med håndmakt

- **ABC-port:** er en standard laget av KA for enkelt å kunne montere sammen de ulike koblingene i ABC-systemet uten bruk av gjenger. Det er tre ulike standard størrelser: small, regular og heavy duty
- **Swivel:** er koblingens hann-del som passer i ABC-porten. En kobling med en swivel kan roteres etter montasje
- **ABC Swivel:** er en kobling laget i messing med én eller to swiveler. Ofte er koblingens motsatte side gjenget
- **ABC Threadless:** betyr «gjengeløs», og koblingen har den samme mannlige ABC-portsiden som swiveler. Threadlesskoblinger er laget i kompositt og har push-in-funksjonalitet. Se figur 3.3
- **ABC Integral:** en 90-graders kobling med en hunn-ABC-port samt en push-in-side
- **ABC New Line:** en kobling i messing med en push-in-side og en gjenget portside
- **ABC KArtridge:** en kobling i kompositt med en push-in-side og en spesiell KArtridge-portside
- **ABC Byggeblokk:** er en serie med ulike byggeblokker. Eksempelvis union, T-, L-, og F-blokker
- **Bulkhead:** er en kobling som fungerer som gjennomføring
- **Hus/koblingshus:** er hoveddelen av koblingen, de andre komponentene monteres på huset
- **Cone element:** er den delen av push-in systemet som holder de resterende komponentene på plass inne i huset
- **Primærtetning:** er o-ringene som gjør koblingen lufttett
- **Sekundærtetning/miljøtetning:** er en o-ring hvis funksjon er å beskytte koblingen mot ytre forurensing
- **Gripering:** er en konisk ring i messing kappet som en sprengskive. Ringen gjør at slangen sitter fast i push-in-siden
- **Støtterør:** er et rør som sitter midt inne i huset. Støtterøret er stift og sørger for at det fleksible røret som monteres holdes på plass slik at koblingen er tett
- **Star washer:** er en taggete skive som brukes i portsiden av KArtridge for å holde koblingen på plass inne i den glatte porten som koblingen er montert i
- **Låseskive:** er en skive i plast som holder star washeren på plass

### 3.1.2 ABC Push-in family

ABC-systemet har som nevnt tre hovedgrupper, og én av disse er push-in-familien. Produkter som inngår i push-in-familien er ABC New Line Push-in, ABC Threadless Push-in, ABC Integral Push-in og ABC KArtridge. De ulike koblingene vises i figur 3.3:

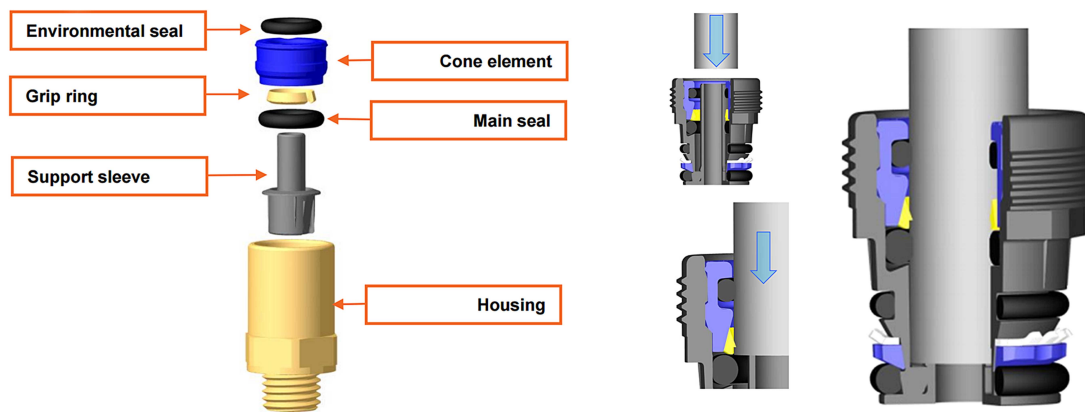


Figur 3.3: Ulike produkter i ABC Push-in familien (KA, 2016a)

Felles for disse produktene er en push-in port som gjør det mulig å montere koblingene bare ved å presse røret inn i push-in porten. Montasje av rør illustreres i figur 3.4. Kombinasjonen av coneelementets geometri og en gripering i messing sørger for at røret blir sittende fast. Med et spesialverktøy som skyves inn i koblingen kan røret likevel demonteres fra push-in porten, men det anbefales å ikke demontere en kobling mer enn fem ganger. KA leverer push-in-koblinger for rør i dimensjonen 4x1, 6x1, 8x1, 10x1, 10x1,25, 10x1,5, 12x1,5, 12x1,5, 14x2, 15x1,5, 16x2, 18x2 (ytre diameter x rørtykkelse i [mm]), men også dimensjoner i Imperial-systemet: 1/4", 3/8", 1/2", 5/8" og 3/4". Det blir totalt 17 ulike rørtyper. Push-in systemet har dessuten fire sikkerhetsfunksjoner:

- «Grip-then-seal» prinsipp som sørger for at røret først gripes, og deretter blir lufttett
- Et tilbakemeldings-signal sørger for korrekt montasje av røret ved å gi en distinkt klikkelyd ved riktig montasje
- En sikkerhetsventil vil lage en skingrende lyd om koblingen er feilmontert
- Systemet er som nevnt mulig å demontere

De ulike komponentene som inngår i koblingens push-in-side vises i figur 3.4a. Miljøtetningen er montert inne i coneelementet og har som funksjon å sørge for at smuss holdes vekk fra trykkluftssystemet. Coneelementet er den komponenten som holder de resterende komponentene på plass i koblingshuset, og har dessuten en konisk form som gjør at griperingen klyper røret slik at det holdes på plass. Hovedtetningen har som funksjon å gjøre koblingen lufttett, og støtterøret skal sørge for at det røret holdes på plass inne i koblingen. Det innebygde tilbakemeldingssignalet er en funksjonalitet bygd inn i støtterøret.



(a) En eldre New Line-kobling med oversikt over de ulike elementene i push-in porten (b) Figuren viser hvordan et rør monteres i en push-in-kobling

Figur 3.4: Sammenstilling og bruk av ABC Push-in (KA, 2013)

### ABC New Line Push-in

New Line-serien er laget med koblingshus i messing med en gjenget portside, og en push-in side laget i kompositt. Det finnes også spesielle varianter der portside er en slangenippel. Behovet for messinghus kommer av at standarden for trykkluftskoblinger ikke tillater gjenger i kompositt. Produktet benyttes typisk mot EBS-systemer, trykkluftstanker, ventiler, eller andre tilfeller der montering ved hjelp av gjengeforbindelser er nødvendig. Med 17 ulike push-in-sider og et stort utvalg i både imperial og metriske gjengeforbindelser blir det et stort utvalg ulike varianter. New line-serien ble lansert i 2006 og vektoptimalisert i 2015. Forskjellen kan sees ved å sammenligne figur 3.3 og 3.4a.

### ABC Integral Push-in

Integral er en 90-graders byggeblokk med én hunn-ABC-port i small, regular eller heavy duty størrelse og en ferdigmontert push-in-side for montering av rør. Koblingen benyttes ofte i kombinasjon med Swivel-koblinger som for eksempel skrues fast i en bremsekaliper. Integral-koblingen vises i figur 3.3; legg merke til hvordan koblingshuset er designet for å være robust mot slag og støt.

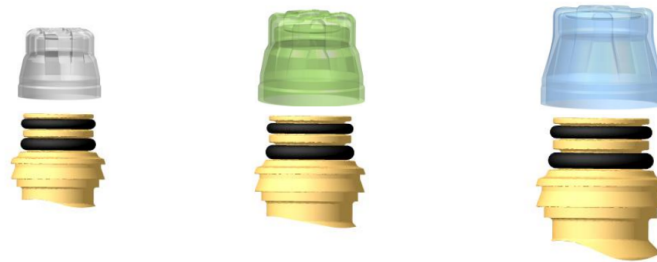
### ABC Threadless Push-in

Threadless er ABC-portens motpart i form av at koblingens portside er en «swivel». Swivel og ABC-port kobles enkelt for håndt ved å presse med en kraft på omtrent 70 newton. Ved riktig montering får montøren både en fysisk montasjefølelse samt en tydelig klikkelyd. Som navnet tilsier kan en swivel roteres, selv etter korrekt montasje med en ABC-port. Systemet kan demonteres ved å bruke en standard nåltang til å avlaste to klaffer på ABC-portens hundel slik at swivelen løsner. De ulike swivel- og portstørrelsene vises i figur 3.6 med sine respektive beskyttelseshetter. ABC-porten er 15, 17 og 20 mm i diameter for hhv. small, regular og heavy duty. Threadless-koblinger brukes mye sammen med

byggeklosser når rør skal fordeles. Et eksempel vises i figur 3.9. *Merk at Swivel også er navnet på en egen produktgruppe under ABC Building Blocks.*



Figur 3.5: Threadless (KA, 2016a)



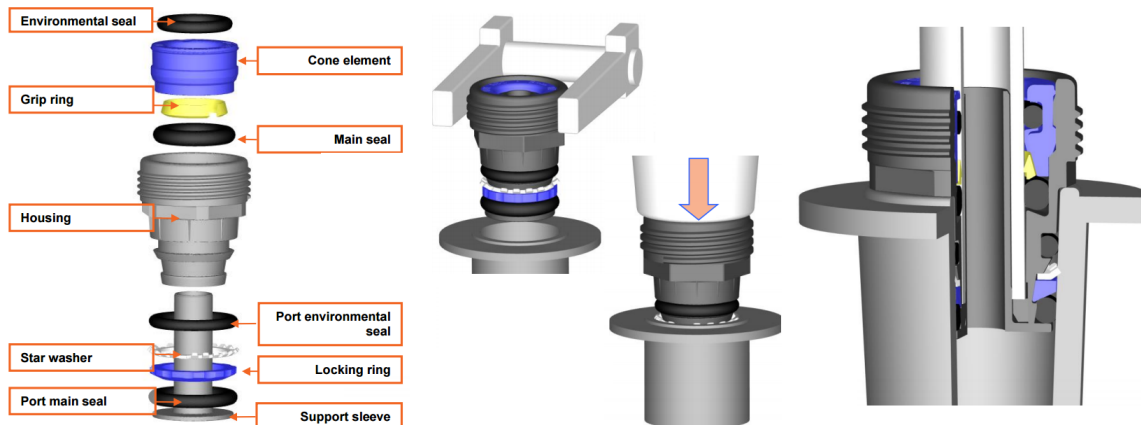
Figur 3.6: Swivel i small, regular og heavy duty med fargemerkede beskyttelseshetter (KA, 2016a)

### ABC KArtridge

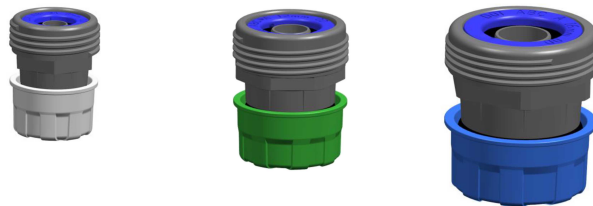
KArtridge er KA sin nyeste koblingsserie, og er laget med et ønske om å erstatte gjengene New Line benytter. Portsiden er laget slik at koblingen enkelt monteres i glatte porter bare ved å presse den inn. En star washer og låseskive sørger for at koblingen blir sittende, men det er mulig å demontere koblingen med et spesialverktøy. Lastebilprodusenter som Volvo kan gjøre store besparelser ved å støpe komponenter som brukes i bremsesystemet med glatte porter der KArtridge-koblinger kan monteres. Normalt ville dyre gjengeforbindelser blitt benyttet sammen med tunge og dyre messingkoblinger, men dette erstattes av KArtridge-koblinger som enkelt presses inn i porten. Koblingene har dessuten en ekstra o-ring for beskyttelse mot ytre forurensing, og koblingen kan benyttes i porter både av kompositt og aluminium. Montasjeprosessen krever en kraft fra 600 til 1200 newton avhengig av portens størrelse. Se figur 3.7 for en illustrasjon av komponentene i en KArtridge kobling og hvordan koblingen monteres i glatte porter.

KArtridge-koblingen har den samme push-in-funksjonaliteten som de andre koblingene i push-in-familien, men portsiden er unik. Den består av en miljø-, og hovedtetting som tetter og beskytter koblingen, men også en star washer og låsering som holder koblingen på plass i porten. Støtterøret fungerer på samme måte som i de andre push-in-koblingene, men er annerledes designet hos KArtridge-koblingen, og monteres fra portsiden i motsetning til push-in-siden. KA har laget en egen standard med tre ulike størrelser;

small, regular og heavy duty. I figur 3.8 presenteres de ulike størrelsene med fargekodede beskyttelseshetter.



Figur 3.7: Illustrasjon av en KARtridge-kobling. Til venstre vises komponentene som utgjør koblingen mens montasjen av en KARtridge-kobling i en glatt port vises i senter. Til høyre vises en ferdigmontert kobling i en glatt port med et rør montert i push-in siden (KA, 2016b)



Figur 3.8: KARtridge-port i small, regular og heavy duty med fargekodede beskyttelseshetter (KA, 2016b)

### 3.1.3 ABC Building Block System

ABC-systemets byggeblokker gjør systemet modulært slik at ulike koblinger og rørdimensjoner kan kombineres til et komplett system. ABC Building Block System kan deles inn i to hovedgrupper:

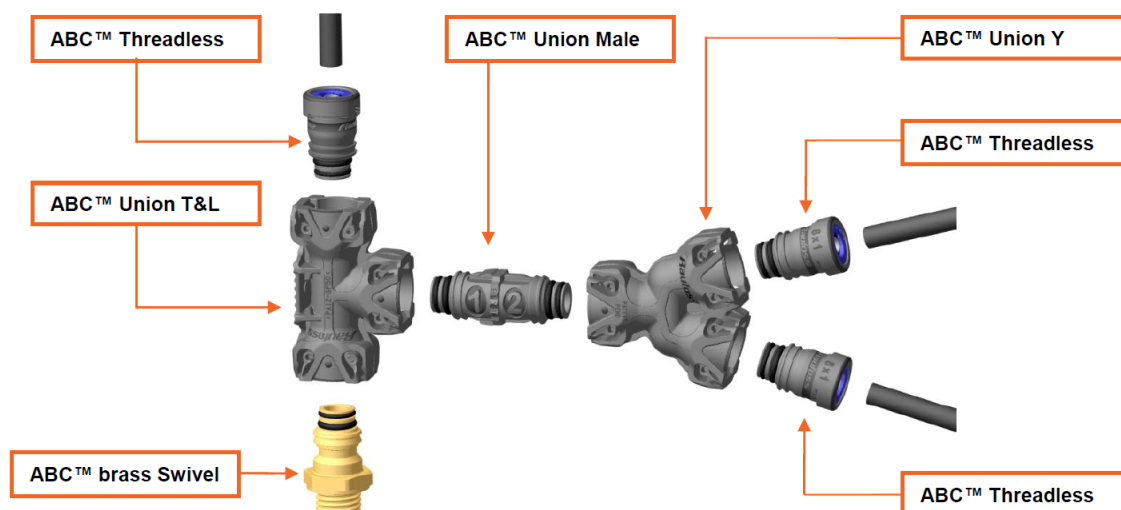
- ABC Building Block System
- ABC Swivel

Et utvalg av produkter som inngår i de ulike gruppene vises i figur 3.9.

#### ABC Building Block System

ABC Building Block System består av byggeklosser laget i kompositt med ABC-porter i small, regular, eller heavy duty størrelse. To ulike byggeblokker vises i figur 3.9: en





Figur 3.9: En typisk kombinasjon av byggeklosser fra KA sammen med en ABC Swivel og tre ABC Threadless (KA, 2013)

ABC Union T&L og ABC union Y. Som illustrert muliggjør byggeklossene å kombinere ABC-systemets andre produkter til et fullverdig, modulært system. Andre produkter som inngår i byggesystemet er blant annet 3- og 4-veis fordelere, ABC Union Female, vinklede koblinger og dessuten ABC Reducer som gjør det mulig å gå fra eksempelvis regular til small. Montering av byggeklosser med en ABC-port og swiveler gjøres enkelt ved å presse sammen de komponentene med en kraft på omtrent 70 newton. Ved riktig montering får montøren både en fysisk montasjefølelse samt en tydelig klikkelyd. Systemet kan demonteres ved å bruke en standard nåltang til å avlaste to klaffer på ABC-portens hundel slik at swivelen løsner.

### ABC Swivel

ABC Swivel favner i hovedsak om ulike Swivel-koblinger i messing, men også ABC Union Male som vises i figur 3.9. Sistnevnte lages i fem ulike varianter. Koblingene har som navnet indikerer minst én swivel, og kan derfor monteres med andre produkter med en small, regular, eller heavy duty ABC-port. Montasjen foregår på samme måte som med byggeblokker og Threadless-koblinger. Messingswiveler benyttes der det er behov for gjengeforbindelser. Eksempelvis i gjennomføringer, eller mot trykkluftstanker i metall. KA har flere typer swiveler, blant annet spesialprodukter som Bulkhead Swivel som vist i figur 3.10b, og Double Swivel Bulkhead i figur 3.10a. At koblingene er gjenget, at det finnes tre ulike portstørrelser, og det faktum at det finnes ulike lengder og utforminger av swivel-koblingene fører til at KA produserer svært mange ulike varianter av disse koblingene.



(a) Double Swivel Bulkhead

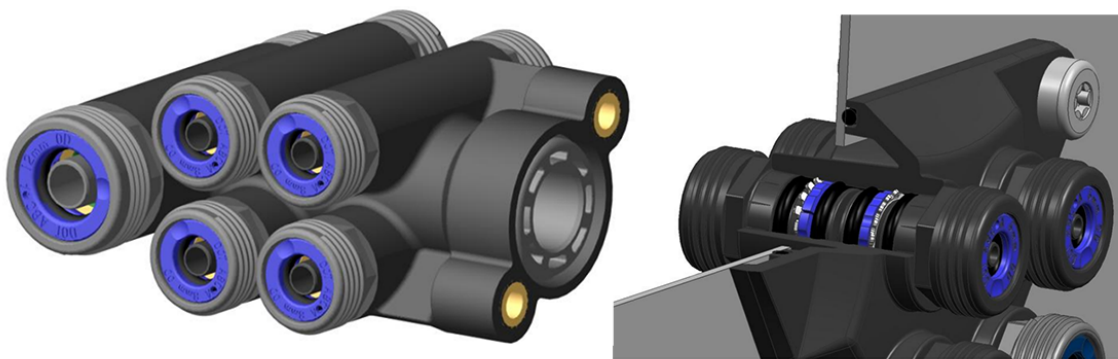


(b) Swivel Bulkhead

Figur 3.10: To spesielle varianter av ABC Swivel Bulkhead (KA, 2016a)

### 3.1.4 ABC Manifolds

En ABC Manifold er som navnet indikerer et produkt som fordeler luftstrømmen. Manifoldene fra KA er støpt i kompositt med glatte porter laget for montering av KArtridgekoblinger. Etter kundens ønske kan KA forhåndsmontere koblinger i de portene som er ønsket, de resterende plugges. Med de ferdigmonterte manifoldene reduserer kjøretøyproduzentene antall montasjesteg ved sine produksjonslinjer. Alternativet til manifolder er å kombinere byggeklosser og Threadless-koblinger. Et eksempel på en distribusjonsblokk vises til venstre i figur 3.11. Manifolden til høyre i figuren er en bulkhead-manifold. KA utvikler dessuten mer kundespesifikke manifolder der enkelte manifolder lages med en «marriage-løsning». Dette innebærer at manifolden er delt i to og kan føres sammen for å koble sammen flere rør på én gang. Et eksempel er en manifold montert på hhv. chassis og lastebilens hytte, ved montasje av lastebilhytten vil manifoldene kobles sammen og forbinde luftstrømmen. Marriage-løsningen er laget med poka-yoke egenskaper slik at feilmontasje elimineres og montasjeprosessen kan gå raskere.



Figur 3.11: To ulike manifolder fra KA med ferdigmonterte KArtridgekoblinger. Til venstre vises en fordeler og til høyre en spesialdesignt bulkhead manifold (KA, 2013)

### 3.1.5 Tilleggsprodukter

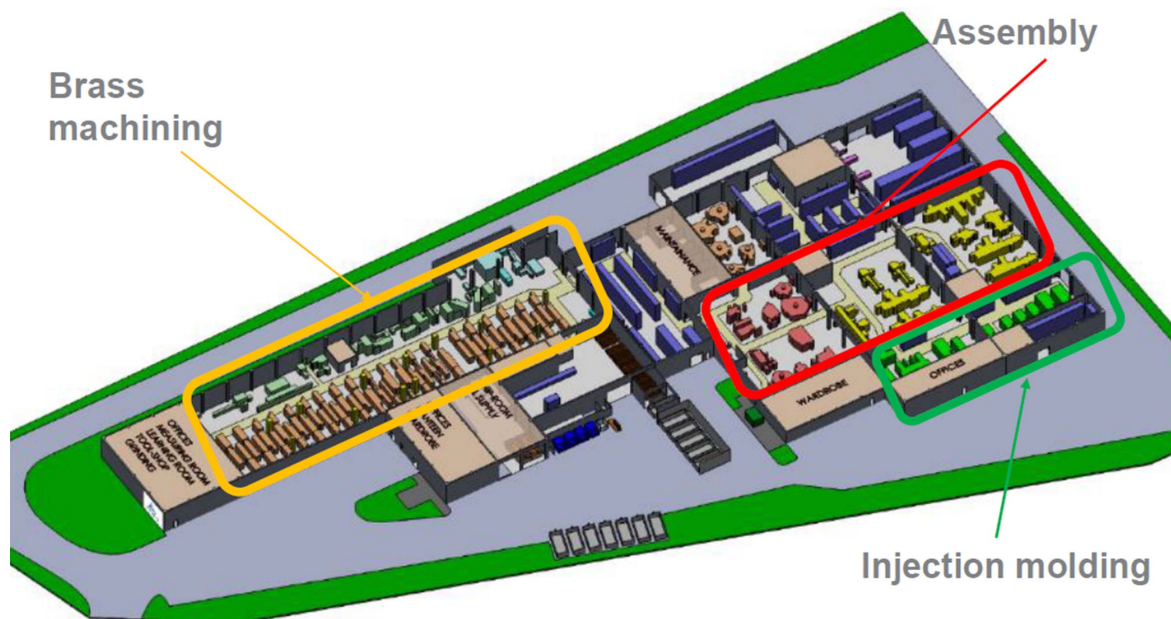
I tillegg til de kategoriserte produktene leverer KA et ganske stort antall spesialkoblinger. En stor andel av disse er ulike bulkhead-koblinger, men det lages også adaptere, plugg og testpunkter. Mange er dessuten kundespesifikke, og oppgis ikke i den offentlige produktkatalogen. Eksempler på tilleggsprodukter vises i figur 3.12.



Figur 3.12: Tilleggsprodukter produsert av KA (KA, 2016a)

## 3.2 Produksjonsanlegg

Fabrikkområdet på Raufoss benytter totalt 10300 m<sup>2</sup>, og det leveres omtrent 2,5 millioner ferdige produkter hver uke. I figur 3.13 vises en enkel illustrasjon av produksjonsanlegget der maskinerings-, sprøytstøping- og montasjeavdelingene er avmerket.



Figur 3.13: Fabrikkoversikt Kongsberg Automotive Raufoss. Lageravdelinger vises som lilla bokser

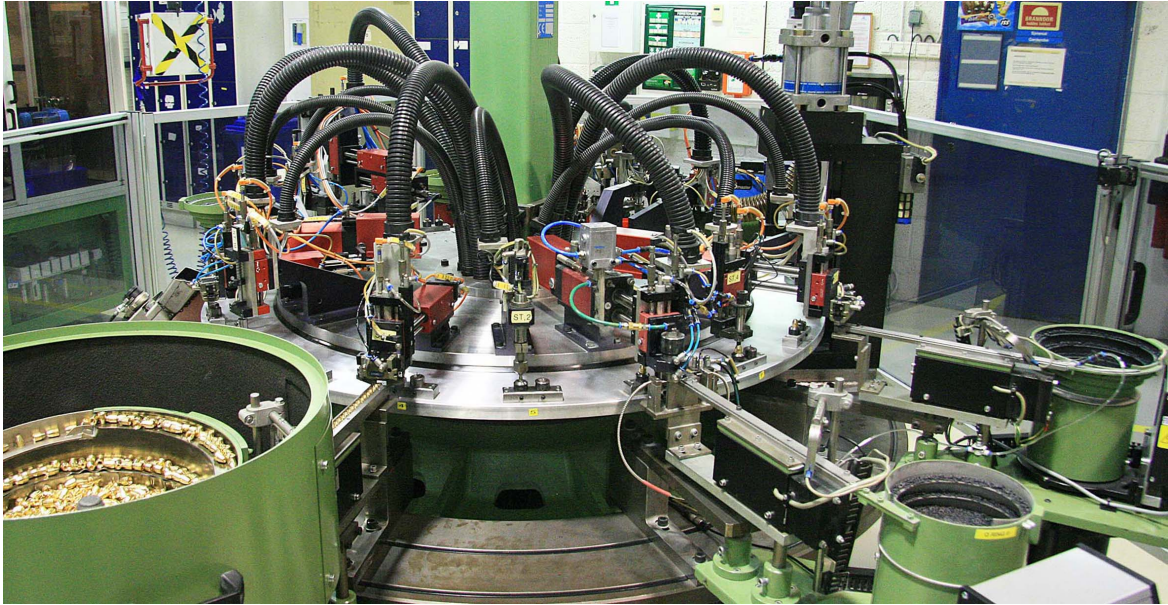
Maskineringsavdelingen bearbejder utelukkende messing og har 40 flerspindel-maskiner i arbeid. Avdelingen benytter i tillegg 4 transportmaskiner som også disponerer ulike industriroboter. Sponhåndtering og vasking av ferdigmaskinerte komponenter er i stor grad automatisert. Avdelingen produserer ukentlig opp mot 3 millioner deler. I avdelingen for sprøytstøping produserer 13 maskiner fra Engel og Netstal omtrent 2,5 millioner komponenter i kompositt hver uke. I denne avdelingen er råvarehåndtering helautomatisert. De ferdigproduserte komponentene pakkes enten for ferdigvarelager, eller går til videre montasje. Montasjeavdelingen er delt inn i BRK-montasje og ABC-montasje, og vises hhv. som rødt og gult i figur 3.13. Avdelingen benytter i dag 28 automatiserte montasjemaskiner levert av Mikron, Ohrmann, Intek og Tronrud, men også manuelle montasjestasjoner. Dessuten har Kongsberg Automotive 5 semiautomatiske produksjonslinjer som arbeider for Kongsberg Automotive Raufoss i Polen.

### **3.3 Montasjeavdelingen**

Montasjeavdelingen hos KA er i figur 3.13 delt inn i to hovedgrupper; BRK-montasje og ABC-montasje, men internt hos KA er det vanlig å skille mellom messing- og komposittmontasje. Messingmontasje inkluderer komponenter fra både BRK- og ABC-serien, og er den avdelingen som benytter seg av størst fabrikkareal. Avdelingen har både gamle rundbordsautomater og ulike pallettautomater, men også stasjoner for manuell montasje. I komposittmontasjen er det i hovedsak pallettautomater, men også en manuell montasjestasjon.

#### **3.3.1 Rundbordmontasje**

Hoveddelen av BRK-produktene produseres i dag med gamle rundbordsautomater bygget av INTEK AS og Tronrud Engineering AS på starten av 90-tallet. Prinsippet er et sirkulært bord med fiksturer som roterer et bestemt antall grader én gang for hver takt. Montasje- og kontrollstasjoner står plassert rundt bordet og utfører den samme operasjonen hver gang bordet roterer. Mating foregår typisk med bollematere og lineærføringer, men KA bruker også industriroboter i enkelte av sine automater. En rundbordsautomat som brukes i produksjon hos KA kan sees i figur 3.14. Rundbordsautomatene er lite fleksible, og de fleste kan bare montere 2–3 ulike produkter. De har typisk syklustid på omtrent 3 sekunder og benytter et gulvareal på omtrent 25 m<sup>2</sup>.



Figur 3.14: Rundbordsautomat hos KA som monterer produkter i BRK-serien. Det sirkulære aluminiumsbordet roterer, og i forkant vises 3 bollematere med lineærføringer

### 3.3.2 Pallettmontasje

I samarbeid med det sveitsiske selskapet Mikron utviklet KA automatisert montasje av ABC-koblinger i 2006. I løpet av de påfølgende årene ble det bygget flere maskiner som bruker pallettfiksturer (se figur 4.7 for nærbilde av en pallett) i stedet for de tradisjonelle rundbordene; endringen skyldes at KA ønsket mer fleksible maskiner. Flexibilitet betyr i denne sammenhengen at maskinen er omstillbar slik at det er mulig å montere et større utvalg produkter, men ikke at maskinen er «universal». Til hvert produkt må det lages et «verktøysett». Det vil si egne pallettfiksturer, gripere og software. Maskinen er fleksibel i den forstand at palletter, gripere og software kan byttes slik at flere ulike produkter kan produseres. Et eksempel på en av KA sine Mikron-maskiner er automaten som monterer KARtridgekoblinger. Den ble bygget i 2008 og har mulighet til å produsere 6 ulike dimensjoner av KARtridge. Hvert verktøysett koster omtrent 1,5 millioner kroner og omstillingstiden er rundt 2 timer. Maskinen har en syklustid på 2,5 sekunder og bruker et gulvareal på omtrent 120 m<sup>2</sup>. Det at hvert verktøysett koster godt over 1 million kroner gjør det økonomisk uforvarlig å utvide maskinen med nye produkter som bare har lave volum.

I figur 3.15 vises en Mikron-automat som produserer Threadless-koblinger. Maskinen ble levert i 2007 og kostet 9–12 millioner kroner. Selve montasjestegene inne i maskinen bruker flere av de samme prinsippene som rundbordsautomatene. Matesystemer bringer komponentene frem til gripere som gjør ett bestemt montasjesteg hver eneste syklus. Det forrige montasjesteget kontrolleres og palletten flytter seg videre til en ny aktuator. Mikron har tatt i bruk andre materer med visionsystemer i tillegg til de tradisjonelle bollematere. De nye materene kalt «Polyfeeder» innebærer en viss fleksibilitet.

Systemet benytter et vibrasjonsbord for å separere deler, vision for lokalisering og en fler-akset griperarm for å plukke identifiserte komponenter. I figur 3.16 vises et nærbilde av en Mikron Polyfeeder i det øyeblikket maskinen rister komponentene for å oppnå ønsket orientering. I figur 3.15 er polyfeederene skjult av maskinens deksler.



Figur 3.15: Pallettautomat levert av Mikron for produksjon av Threadlesskoblinger



Figur 3.16: Nærbilde av en «Mikron Polyfeeder» som rister komponentene til venstre for å få riktig posisjonering samtidig som et vision-system lokaliserer deler i den høyre delen. En griper står klar til å montere lokaliserte komponenter

### 3.3.3 Fremtidens høyvolumsautomater

KA er godt fornøyd med sine pallettautomater, men det er visse utfordringer ved omstillinger. Som følge av at det mekaniske systemet må justeres ved omstilling øker risikoen for feil oppsett og stopp i produksjon. Erfaringer viser at de maskinene som stilles om færrest ganger har jevnere produksjon og høyere oppetid. På bakgrunn av dette bygger KA egne maskiner basert på rundbordsmontasje, men med visse endringer sammenliknet med systemet presentert i kapittel 3.3.1. Det nye designet er modulbasert med en stegvis montasje. Spesialiserte mindre delmontasjer kan mates inn på et mer generisk hovedrundbord. Løsningen kan ta færre ulike produkter enn pallettautomaten, men skal være billigere, benytte mindre fabrikkareal og være mer robust.

### 3.3.4 Robotisert manifoldmontasje

KUPP-prosjektet beskrevet i kapittel 2 førte frem til bygging av en robotisert montasjecelle i 2015. Cellen er laget for å montere ferdigproduserte KARtridge-koblinger i ulike manifolder. Investeringen kostet om lag 4 millioner og systemet benytter i dag omtrent 4 sekunder for hver manifold pluss 3 sekunder for hver kobling som skal monteres. En manifold med 2 koblinger monteres dermed i løpet av 10 sekunder. Systemet er robust og produserer uten feil, men cellen kjører i dag bare 1/3 av tilgjengelig tid. Kundespesifikke krav har ført til utvikling av nye manifolder med design som dagens celle ikke klarer å gripe, og produksjonen av de kundespesifikke manifoldene må derfor gjøres manuelt. Et oversiktsbilde av montasjecellen vises i figur 3.17. Cellen benytter et gulvareal på omtrent 35 m<sup>2</sup>.



Figur 3.17: Bilde av montasjecellen for manifolder. De svarte boksene er blistere for oppbevaring av KARtridgekoblinger. Sentralt til høyre vises to flexfeedere i aluminium

### 3.3.5 Manuell montasje

Med unntak av kundespesifikke lavvolumsprodukter har alle KA sine produkter blitt automatisert, men ikke i alle mulige dimensjoner. Grunnen er lav etterspørsel for utvalgte dimensjoner slik at en spesialisert montasjemaskin ikke lønner seg. Disse produktene blir derfor montert manuelt. Montasjen foregår i hovedsak uten hjelp av maskiner, men enkelte o-ringer settes på med en halvautomatisk maskin fra produsenten Ohrmann

Montageteknik. Dessuten brukes en delvis automatisert presse med innebygde sensorer for å presse sammen push-in siden av koblingene. Denne pressen sørger for høy kvalitet ved at sammenpressingstrykket blir kontrollert, koblingens høyde måles og sensorer og kameraer sjekker at montasjen er riktig. Pressen vises i figur 3.18b og 3.18c. Ved annen manuell montasje er den utføres en rent visuell kvalitetskontroll basert på montørens eget skjønn. Et eksempel på montasje med ren visuell kvalitetskontroll er den enkle pressen vist i figur 3.18a. Takttid for manuell montasje varierer fra 25–60 sekunder per operatør. Den nødvendige tiden avhenger av produktets kompleksitet og antall komponenter som skal monteres. En manuell montasjecelle hos KA med plass til 3–4 montører benytter seg i dag av omtrent 25 m<sup>2</sup>.



(a) Manuell montasje med ren visuell kvalitetskontroll. Det brukes spesielle fiksturer for de forskjellige produktene



(b) Manuell montasje med en delvis automatisert presse. Pressen kvalitetssikrer koblingen ved bruk av induktive og optiske sensorer



(c) Bildet viser arbeidssituasjonen med den automatiserte pressen produsert av det svenske selskapet Löfs

Figur 3.18: Manuell montasje hos KA



### 3.3.6 Materialflyt

En lageransvarlig hos KA transporterer komponenter fra lageret vist i midten av fabrikkens på figur 3.13 frem til de ulike montasjestasjonene. Komponentene er i all hovedsak lagret i bulk; løst i større bokser eller innpakket i plastposer. Sistnevnte gjøres for å forhindre tilsmussing av komponentene. Operatører mater manuelt magasiner og bollematere på maskinene med komponenter fra poser eller andre beholdere. De ferdigmonterte produktene havner i standard pappesker eller poser som manuelt må lukkes, merkes og stables på paller for transport til ferdigvarelageret. Ved omstilling av maskiner må matesystemer manuelt tømme for komponenter med feil dimensjon. Se eksempler på materialhåndtering i figur 3.19.

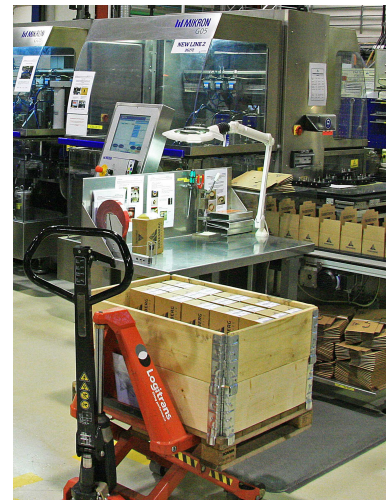
- Manuelle montasjestasjoner monterer ofte så små volumer at operatørene selv henter deler i lageret
- Ferdigmonterte KARtridge fraktes i blistere og ikke i bulk. Blistere brukes blant annet for å forenkle manifoldmontasjen



(a) Et system for manuell påfylling av støtterør til en MIKRON-maskin



(b) Transportøren mates manuelt med komponenter fra pallen nede i det venstre hjørnet



(c) I bildet vises en kontrollstasjon og ferdigpakkede kartonger med KA-produkter

Figur 3.19: Materialhåndtering hos KA

### 3.4 Økonomi

Hos KA blir det hvert år beregnet timepriser for de ulike produksjonsstasjonene. Inkludert i timeprisen er alle kostnader; blant annet operatørkostnad, avskrivninger, arealbruk og strøm. For manuell montasje er prisen 350 kroner i timen mens den automatiserte montasjen har priser mellom 850 og 910 kroner i timen.

I tabell 3.1 vises grove kostnadsoverslag for montasje av utvalgte produkter fra KA. Tallene er hentet fra overslag gjort av KA selv i tillegg til enkel beregninger basert på de nevnte timeprisene. Til grunn for beregningene ligger også en gjennomsnittlig oppetid på 80% og 2,5 s syklustid. For den manuelle montasjen varierer produksjonshastigheten mye fra produkt til produkt. For New line-koblinger som har en avansert push-in side monterer en montør i gjennomsnitt 60 koblinger i timen. Montasje av swiveler ligger derimot opp mot 160 i timen. Det som produseres hos ATS har en ekstra transport- og logistikkostnad, men på grunn av korte avstander er denne svært liten. For montasjen som foregår i Polen er de nevnte ekstrakostnadene derimot større. I tabell 3.1 er det tydelig at den manuelle montasjen er dyrere enn den automatiserte, men merk også at ATS kan gi en god pris som følge av sin status som vernet bedrift. Eventuelle ekstra logistikkostnader er ikke inkludert i tabell 3.1. *Som nevnt innledningsvis i kapittel 3 er data hentet i ulike interne dokumenter og etter samtale med ansatte hos KA.*

Tabell 3.1: Omtrentlig kostnad per montasje

<b>Produkt</b>	<b>Produksjonsmetode</b>	<b>Montasjekostnad per produkt [NOK]</b>
Swivel enkel	ATS	0,45
Swivel	ATS	0,60
Swivel dobbel	ATS	0,90
Swivel enkel	KA automatisert	0,60
Swivel enkel	KA manuell	1,75
New line	KA automatisert	0,60
New line	KA manuell	5,83

# Kapittel 4

## Montasje hos Kongsberg Automotive Raufoss

Overordnet informasjon om KA sin montasjeavdeling er presentert i kapittel 3. I dette kapitlet kartlegges derimot de ulike manuelle, og automatiserte montasjeprosessene i detalj. Avslutningsvis belyses dessuten viktige faktorer ved dagens montasje- og produksjonssystem. Disse elementene er resultatet av informasjonsinnhenting gjort både i kapittel 2, 3 og 4. Faktorene er svært sentrale for videre designutvikling, og vil påvirke hvordan en ny fleksibel montasjecelle kan utformes.

### 4.1 Monteringsbegrensninger

Det er visse krav til all montasje av koblinger hos KA:

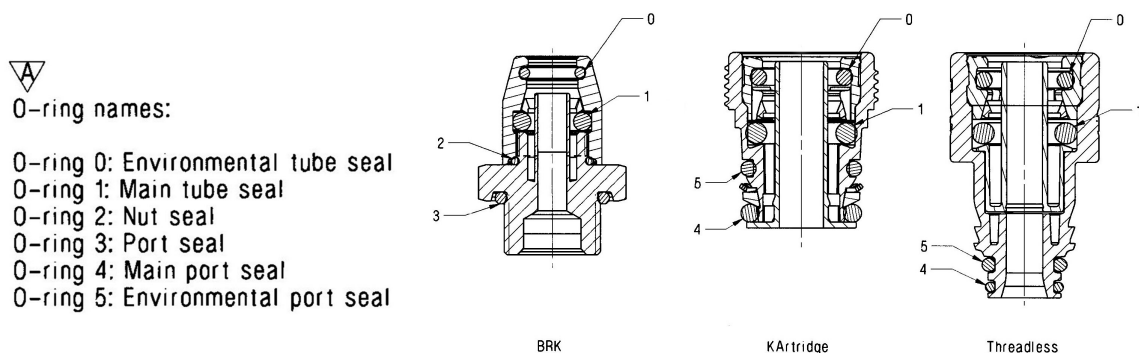
- Overflater der o-ringer skal monteres betegnes som «kritiske flater». Skades disse områdene er det mulig at o-ringen ødelegges slik at koblingen blir lekk. En defekt kobling kan i ytterste konsekvens føre til bremsesvikt, og fatale konsekvenser i trafikken. Det er derfor ikke tillatt å gripe koblingen på kritiske flater
- De ferdige produktene skal være rene, uten smuss. Dette gjelder spesielt o-ringene som er dekket med silikon slik at blant annet støv fester seg lett. Ferdigmonterte o-ringer skal beskyttes med beskyttelseshetter eller plasseres i blistere som forhindrer tilsmussing
- Hver enkelt produkt skal være kvalitetskontrollert
- Gjenger i messing skades lett, og må behandles forsiktig. Skadede gjenger kan føre til at koblingen ikke kan monteres av sluttbrukeren

## Kontrolleringsprinsippet

I den automatiserte produksjonen har KA som prinsipp at hvert eneste montasjesteg blir kontrollert før neste komponent blir montert. Dette fører til at man ikke forsøker å montere nye komponenter på en del som allerede har mangler, og reduserer på denne måten antall komponenter som kastes. Kvalitetssikringen blir dessuten bedre som følge av at koblingen sjekkes flere ganger.

## 4.2 Montasje av o-ringer

Koblingens o-ringer gjør produktet tett, men sørger dessuten for at smuss og forurensing ikke trenger inn i rørsystemet. KA benytter opptil fire o-ringer per kobling; så o-ringmontasje er en essensiell del av montasjeprosessen. Under montasje er det viktig at o-ringen ikke blir skadet, og det må dessuten påføres silikon. Til slutt må koblingens synlige o-ringer dekkes av en beskyttelseshette eller plasseres i en blister slik at tetningen beskyttes. Se figur 4.1 for en oversikt, og benevning av de ulike o-ringene KA benytter.



Figur 4.1: En oversikt over KA sine ulike o-ringer og hvordan de brukes i BRK og ABC-koblinger

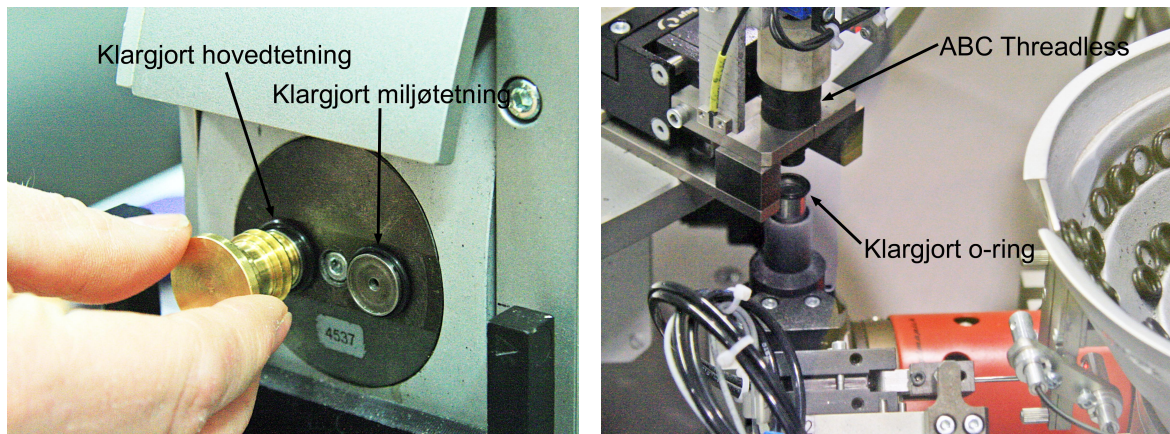
### Ytre o-ringer

Ytre o-ringer brukes i hovedsak som miljø- og trykktetning, men også som mutterforsegling i gjennomføringer. Den største andelen er o-ring nr. 4 og 5 i figur 4.1 som brukes på swiveler i størrelse small, regular eller heavy duty. En slik port vises på threadless-koblingen i figur 4.1.

I den manuelle montasjen monteres disse o-ringene i halvautomatiserte maskiner fra Ohrmann Montagetechnik. Maskinen har to bollematere som sorterer o-ringene og presenterer de rundt et sylindrer med en innvendig, liten sylindrisk «luke». Koblingen kan presses inn i luken av en montør, og siden det omkringliggende sylindret er fjærbelastet vil o-ringen skli av og feste seg på koblingen når den presses innover. Etter at o-ring 4 er

på plass tar montøren ut koblingen og steget gjentas for å feste o-ring 5. De to lukene vises i figur 4.2a hvor to o-ringer blir montert på en ABC Swivel Plug. Til slutt tilføres silikon og en beskyttelseshette festes. Er o-ringene montert feil vil forøvrig ikke beskyttelseshetten feste seg. Dette systemet er effektivt og robust, og maskinen tar liten plass.

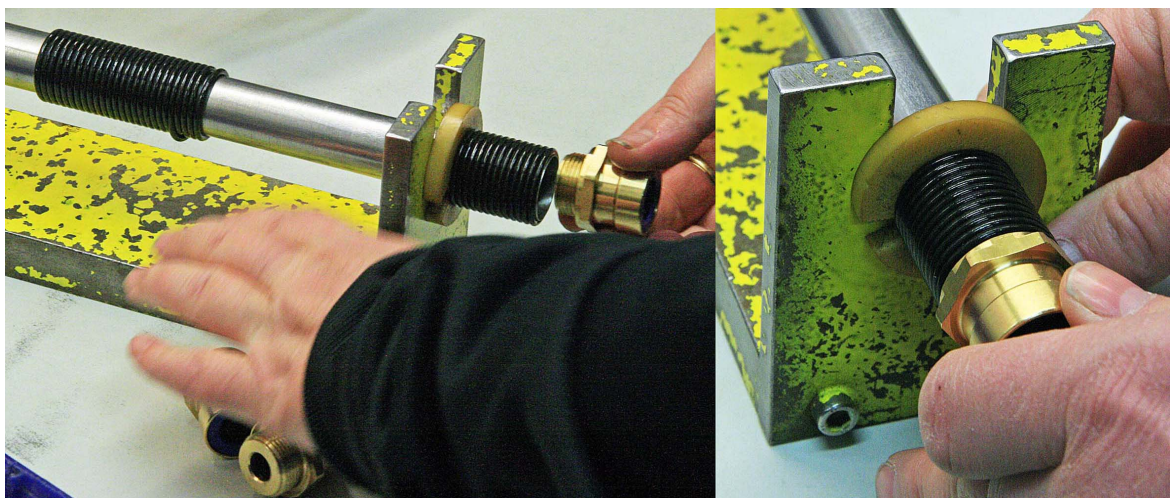
O-ringer til mutterforseglinger (o-ring 3 i figur 4.1) blir i manuellmontasjen montert med en meget enkel innretning. Montøren trer først o-ringene på et rør i passende diameter og fører deretter koblingen inn i røret. Et sylinder gjør at røret kan presses bakover samtidig som en kappe holder igjen slik at en o-ring sklir av, og fester seg på koblingen. Se prosessen i figur 4.3.



(a) Montering av en regular swivel med en Ohrmann halvautomat. Se spesielt hvordan o-ringene er plassert i maskinen før montasje

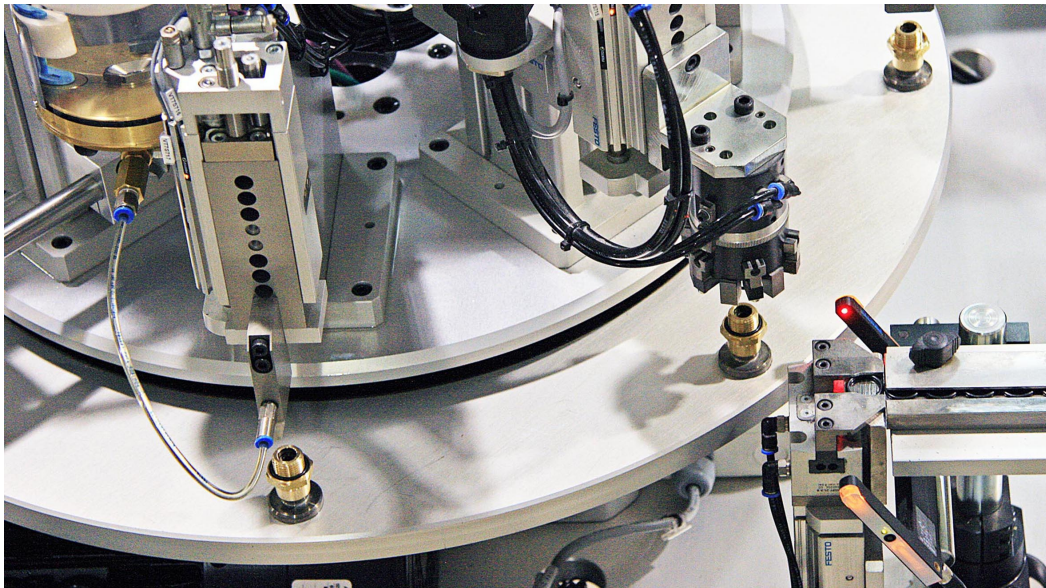
(b) Bilde fra helautomatisk montasje fra Ohrmann. Ohrmann benytter samme prinsipp for o-ring-montasje i sine helautomatiserte systemer som i halvautomaten

Figur 4.2: Ohrmann sitt prinsipp for montasje av ytre o-ringer



Figur 4.3: Manuell montasje av en ytre o-ring på en ABC New Line

I den automatiserte produksjonen blir ytre o-ringer sortert av bollematere, eller fleksible matere med et vision- og plukkesystem. I Mikron-maskinene blir o-ringene plassert på spesielle fiksturer som beveger seg frem til montasjepunktet hvor de til slutt gripes, og monteres med en spesiell griper. Den samme griperen benyttes dessuten i enkelte rundbordsautomater, som vist i figur 4.4. Ohrmann benytter i automatisert montasje bollematere og lineærføringer for å sortere o-ringene. Deretter blir o-ringene grepet og plassert på et sylindere som fungerer likt med halvautomatmaskinen i figur 4.2a. I figur 4.2b vises systemet, og den røde pilen markerer en o-ring posisjonert for montasje.

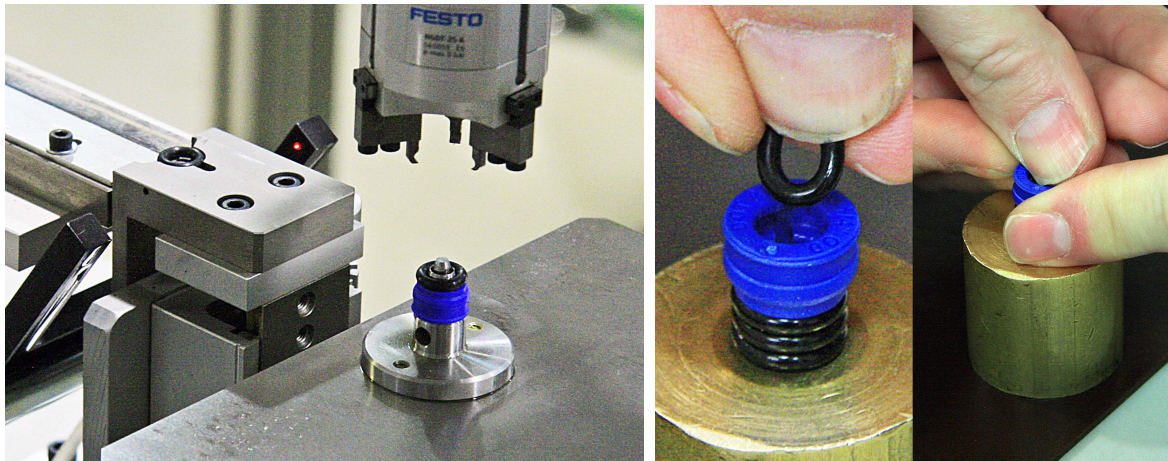


Figur 4.4: Automatisert rundbordmontasje av ytre o-ringer. Til høyre i bildet mates o-ringer med en linjærføring og gripes av en o-ring-griper fra Sommer. Til venstre vises en silikonbeholder koblet til en stasjon for påføring av silikon

## Indre o-ringer

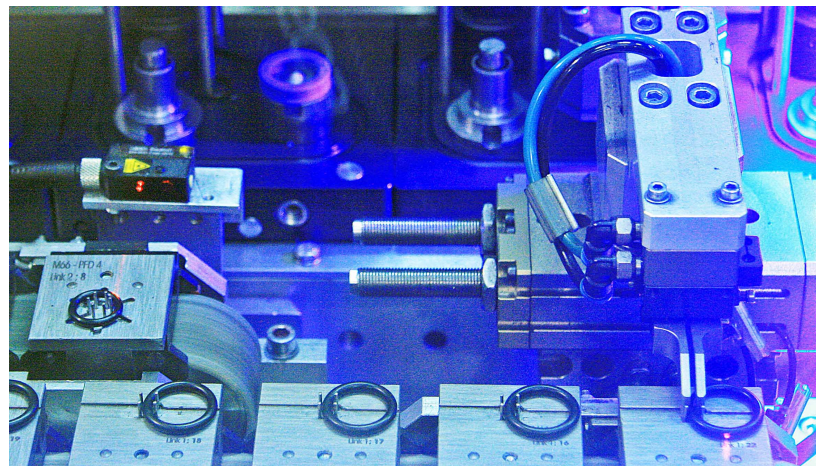
Indre o-ringer vises i figur 4.1 som o-ring 0, 1 og 3. O-ring 0 og 3 fungerer som miljøtetning mens o-ring 1 er en trykketning. For push-in-siden monteres først o-ring 3 inne i coneelementet før resten av komponentene settes sammen med koblingshuset. I manuell montasje gjøres montasjen av miljøtetningen ved å klemme sammen o-ringene og skyve den inn i coneelementet som er plassert på en fikstur. Fiksturen sørger for at o-ringene ikke glir igjennom, og o-ringene smetter derfor på plass inne i coneelementet. Dette vises i figur 4.5b. Prosessen krever visse fingerferdigheter om den skal utføres på en effektiv måte. I den automatiserte montasjen med Mikronmaskiner gjøres monteringen ved at coneelementet plasseres på en fikstur, o-ringene blir lagt på toppen, og en hammer gir tre raske slag slik at o-ringene glir inn i coneelementet. Griperen som plasserer o-ringene på coneelementet vises i figur 4.6. I figuren gripes o-ringene fra en spesiell pallett. En polyfeeder har på forhånd lokalisert, grepet og plassert o-ringene på pallettbannen. Ohrmann har en annen løsning; de sorterer o-ringer med en bollemater, og benytter

et patentert spesialverktøy for å montere den indre o-ring. Verktøyet beveger seg inn i coneelementet og plasserer o-ringene direkte. Også med dette verktøyet må coneelementet være plassert på en spesiell fikstur. Koblingens trykktetning er derimot enklere å montere. Denne o-ring ligger «løst» inne i koblingen mellom støtterøret og coneelementet. Montasjen gjøres ved at o-ringene først plasseres på coneelementet, og deretter presses koblingshuset ned over coneelementet. Montasjesteget der o-ringene plasseres over coneelementet vises i figur 4.5a.



(a) Automatisert palletmontasje der hovedtetning (o-ring nr. 1) plasseres over et cone element (b) Manuell montasje av miljøtetningen (o-ring nr. 2) som sitter inne i coneelementene

Figur 4.5: Montasje av indre o-ringer

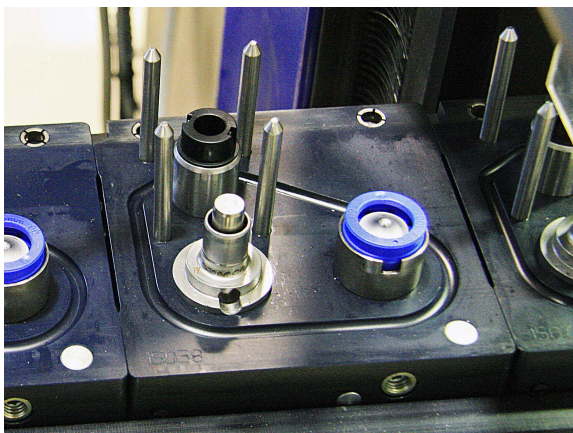


Figur 4.6: Bildet er fra en Mikronmaskin der en aktuator griper o-ringer fra en pallettfikstur for deretter å plassere den over et cone element

### 4.3 Montasje av push-in-siden

En illustrasjon av push-in-siden og dens komponenter vises i figur 3.4a. Det er totalt 5 komponenter som skal monteres inne i koblingshuset: støtterør, hovedtetning, gripering, cone element og miljøtetning. I den manuelle montasjen monteres i dag miljøtetning først i coneelementet. Deretter blir støtterøret plassert i en fikstur og presset inn i koblingshuset. Coneelement med miljøtetning plasseres i en annen fikstur, og gripering og hovedtetning posisjoneres over coneelementet. Huset med støtterøret blir nå ført over de andre komponentene, og til slutt presses alt sammen slik at coneelementet blir sittende i koblingshuset. Prosessen der koblingshus presses sammen med coneelementet vises i figur 3.18.

I den automatiserte montasjen benyttes pallett- eller rundbordsfiksturer for å gjøre de samme stegene som i manuellmontasje. Ofte foregår push-in-montasjen parallelt med montasje av portsiden før huset føres over elementene i push-in-siden og presses på plass. I figur 4.7 vises tidlige steg i prosessen der et cone element og støtterør er plassert på en pallettfikstur før koblingshuset monteres med støtterøret. I de neste stegene vil o-ringene til swivelen monteres parallelt med den indre o-ring i coneelementet. Deretter vil coneelementet gripes, roteres og plasseres på fiksturen som er ledig til venstre på palletten slik at den tidligere nevnte hovedtetningen og griperingen kan plasseres over coneelementet. I figur 4.8 vises den parallelle montasjen tydelig, men nå for KARtridgekoblinger. Et coneelement med o-ring er plassert på en fikstur ved siden av koblingshuset, og montasje av både push-in og portside foregår parallelt. Bildet er et utsnitt av det steget i prosessen som plasserer o-ringene over coneelementet parallelt med star washeren på koblingshuset. Det finnes flere bilder fra montasjeprosessen i vedlegg B.1.



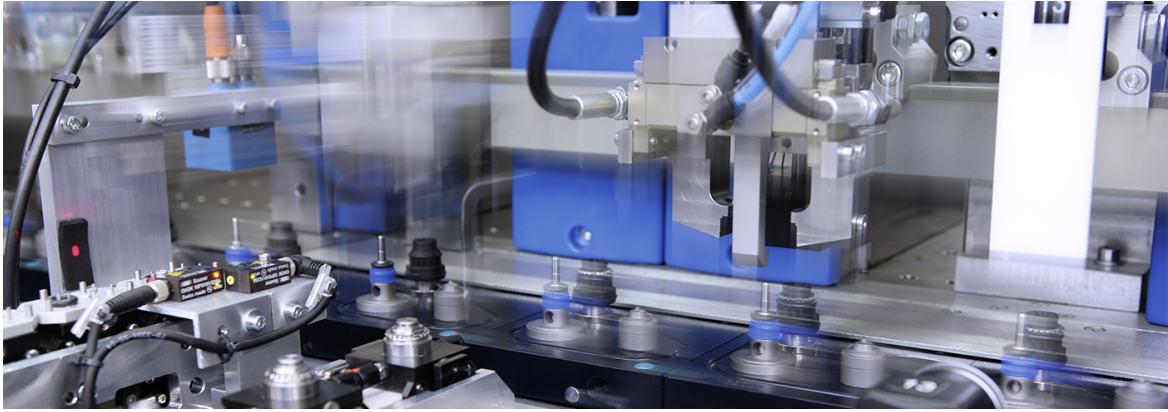
(a) Støtterør og cone element er plassert på pallettfiksturer. Neste steg vises i figur 4.7b



(b) Koblingshuset er plassert over støtterøret og blitt presset ned slik at de to komponentene sitter sammen

Figur 4.7: Montasje av 16 mm Threadless i en Mikron pallettautomat





Figur 4.8: Nærbilde av KArtridge-montasje med en pallett-maskin fra Mikron. Til venstre vises innmating av o-ringer i bestemte fiksturer, og litt nærmere sentrum brukes andre fiksturer for innmating av star-washere. Bildet er hentet fra <http://www.mikron.com/automation-solutions/platforms-systems/>

## 4.4 Montasje av portsider

Portsiden til threadless- og swivelkoblinger består av to ulike o-ringer, silikon, og en beskyttelseshette. Montasjen gjøres ved å plassere koblingshuset i en posisjon der o-ringene kan monteres. Montasje av o-ringer er beskrevet i kapittel 4.2. Beskyttelseshetten monteres ved å klemmes på portsiden med en kraft på omtrent 20–30 newton.

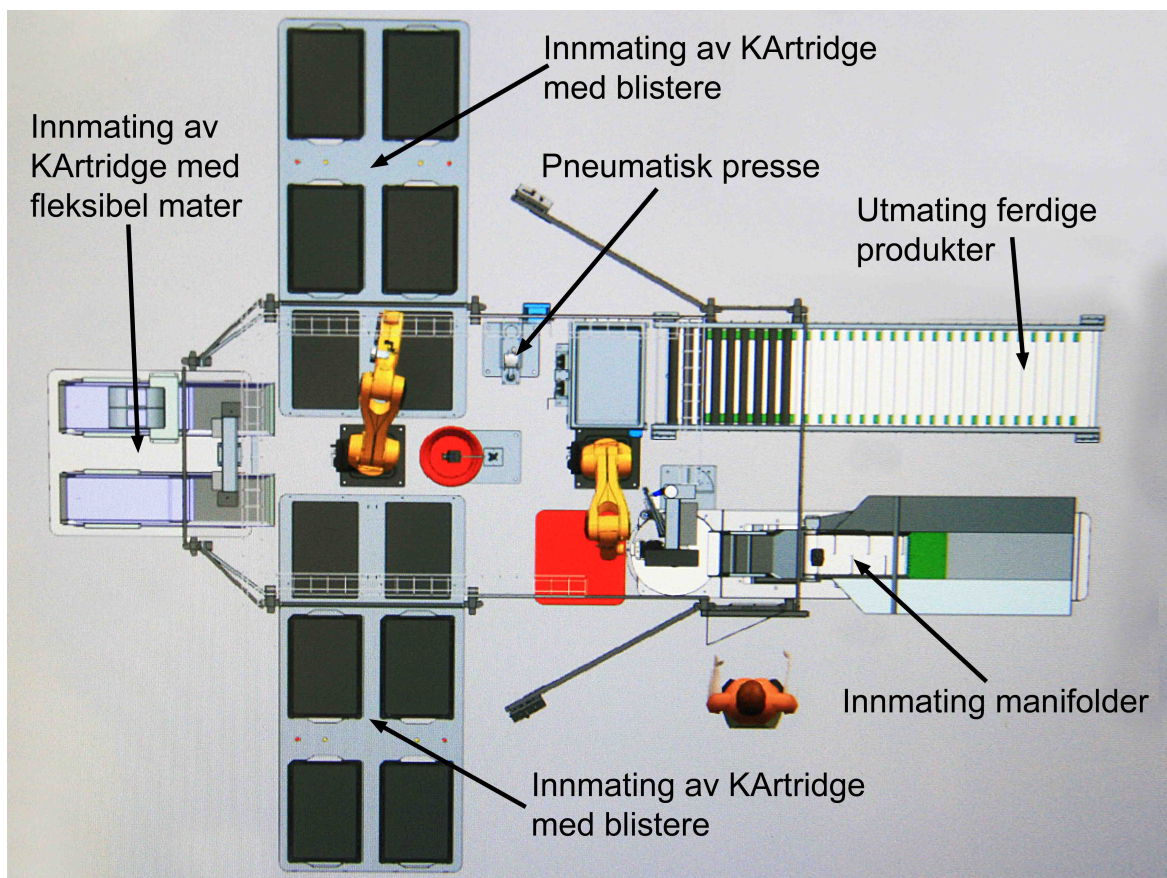
KArtridge sin portside kan sees i figur 3.7 og består av 5 komponenter: miljøtetning, star washer, låsering, hovedtetning og støtterør. Komponentene er montert i den beskrevne rekkefølgen; med miljøtetningen innerst på huset. I den manuelle montasjen blir først miljøtetningen tredd inn på et spor, star washer blir plassert inntil o-ringene og låseringen blir klemt på koblingen slik at disse komponentene sitter fast. Til slutt kommer hovedtetningen og støtterør som må presses sammen med koblingshuset med en kraft opp mot 400 N. I den automatiserte montasjen utføres de samme stegene med spesialiserte griper som plasserer komponentene over huset som er plassert på en spesiell fikstur. Til slutt blir delen presset sammen. Prosessen der o-ring plasseres over coneelementet og star washer legges på koblingshuset vises i figur 4.8. I vedlegg B.1 er det vedlagt flere bilder fra KA sine montasjeprosesser.

## 4.5 Manifoldmontasje

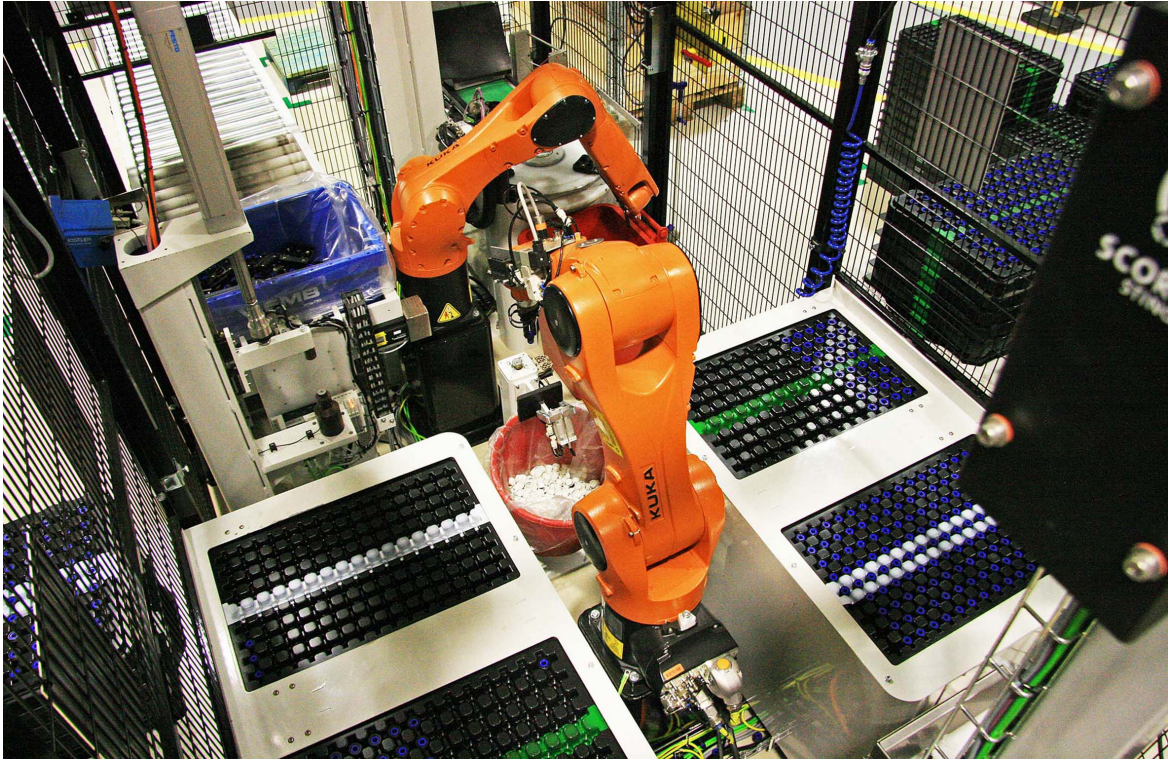
Ferdigmonterte KArtridge-koblinger monteres i helstøpte manifolder ved at koblingene plasseres i glatte porter for deretter å bli presset på plass. Star-washeren sørger for at koblingen blir sittende fast i manifolden. For å presse koblingen på plass kreves det en kraft i størrelsesorden 600, 900 og 1200 Newton for hhv. small, regular og heavy duty.

Manifoldmontasje gjøres i dag både manuelt, og med en automatisert robotcelle. Robotcellen monterer i dag bare fem ulike manifolder siden det er utfordrende å inn-

føre og håndtere nye typer manifold-hus. Cellen består av 2 KUKA Agilus 10kg R1100 roboter, 1 pneumatisk presse, 1 fikstur, 3 matestasjoner med hvert sitt vision-system som kan plukke komponenter fra tilfeldige posisjoner og 2 matestasjoner som jobber med faste posisjoner. Sistnevnte benytter seg av blistere for materialhåndtering; dette sikrer nøyaktig posisjonering av komponentene. Et oversiktsbilde av montasjecellen vises i figur 3.17 mens en skjematisk figur viser layouten i figur 4.9. Figur 4.10 er et nærbilde av robotene, men også andre viktige komponenter er synlige; blant annet vises den pneumatiske pressen til venstre i bildet. Innmating med blister er dessuten synlig på hver side av den nærmeste roboten. Delvis skjult bak den bakerste roboten er innmating av manifold-hus. Mating med flexfeeder vises ikke, men et av systemets kameraer vises delvis helt til høyre i bildet.



Figur 4.9: Layout manifoldmontasje



Figur 4.10: Bilde av manifoldmontasje tatt ovenfor flexfeeder i retning mot mating av manifold

## 4.6 Montasje av kontramuttere

KA leverer et utvalg messingprodukter med ytre o-ringer og kontramuttere. I dag monteres dette manuelt, og det finnes ingen automatisert løsning. O-ringene monteres som beskrevet tidligere i kapittel 4.2. Kontramutterene skrues på for hånd.

## 4.7 Viktige faktorer ved KA sine produkter og produksjon

*Basert på informasjonen presentert i kapittel 2, 3 og 4 belyses forhold ved KA sine produkter og produksjon som kan være viktige med tanke på design av en ny automatisert montasjecelle for KA sine lavvolumsprodukter.*

### 4.7.1 Produkter

Det er en stor variasjon blant KA sine produkter, men noen likheter finnes:

- Swiveler for blant annet Threadless- og Swivelkoblinger lages i 3 ulike størrelser
- KArtridge-porten produseres i 3 ulike størrelser
- Push-in-siden er lik for de ulike produktene med denne egenskapen. Det tilbys push-in for 17 ulike rørtyper

- Sett bort fra Integral og et utvalg bulkhead-koblinger har alle KA sine koblinger en symmetriakse
- KA sine koblinger består av små komponenter med varierende form og størrelse. Eksempelvis elastiske o-ringer, glatte koblingshus og griperinger som lett hekter seg fast. Erfaringen fra KUPP-prosjektet viste at montasjestegene krevde en nøyaktighet på  $\pm 0,2$  mm
- KA ser en trend med økt etterspørsel etter nye, kundespesifikke produkter. Det betyr at det er ventet å komme flere nye produktvarianter i fremtiden. Det er også ventet at etterspørselen etter sammenkoblede koblinger, såkalt klysemontasje, vil øke
- BRK-serien er i en utfasingsfase, og volumet vil med tid bevege seg mot nivåer aktuelle for en mer fleksibel montasjecelle

#### 4.7.2 Produksjon

- **Fakbrikklayout** er hos KA basert på de ulike produktgruppene. Det vil si at automater som produserer New Line står plassert ved siden av hverandre mens montasjemaskinene for Swivel-koblinger er gruppert et annet sted. Layouten er ikke inndelt etter hvilke montasjesteg som gjennomføres
- **Arealbruk:** dagens automater tar stor plass, og kvadratmeterkostnaden for produksjonsbedrifter er høy. Arealbruk ble tidligere nedprioritert i forhold til maskinens takttid, men dette har ført til at KA i dag har et plassproblem. *Den nye montasjecellen bør ha fokus på arealbruk*
- **Robusthet:** dagens fleksible automater, som i realiteten bare er omstillbare, har utfordringer med lavere oppetid sammenliknet med mer spesialiserte maskiner. Ved verktøybytte må gripere, software og fiksturer byttes; og det må ofte gjøres justeringer. I tillegg blir det som regel produksjonsstopp og behov for flere finjusteringer før produksjonen går tilfredsstillende. Dette skaper en uforutsigbar og frustrerende arbeidssituasjon som igjen bidrar til et dårligere arbeidsmiljø. I følge operatører hos KA er det store forskjeller på de ulike maskinene, og det er en sammenheng mellom seriestørrelse og antall ulike produkter som produseres i hver maskin. Eksempelvis føler operatørene at BRK-montasjen går mye bedre som følge av at det benyttes mer spesialiserte rundbordsautomater. I ABC-montasjen benyttes i større grad pallettautomater som kan produsere flere ulike varianter. *Det er kritisk at den nye løsningen er robust*
- **Materialflyt:** materialtransporten i KA sin montasjeavdeling foregår i dag manuelt. Operatører har anslått at ved enkelte tilfeller benyttes opp mot 50% av arbeidstiden til å mate inn komponenter, pakke og flytte ferdigproduserte varer. Sees dette

i lys av lean-filosofi tilfører ikke transport sluttproduktet verdi, og store deler av operatørens arbeidstid er i følge lean klassifisert som sløsing. *Forbedring av materialflyt kan føre til store innsparinger*

- **Pakking** av ferdige produkter foregår i dag ved små manuelle stasjoner plassert ved hver enkelt automat. Ferdigfylte poser eller kartonger lukkes, og en identifikasjonsslapp må festes. Prosessen tar i dag relativt mye av operatørens tid; opp mot 50% av tiden ved produksjon av fysisk store koblinger i følge operatører. Automatisert pakking er en oppgave som er løst ved mange produksjonssystemer, men utfordringen er å få et logistikksystem til å fungere sammen med resten av produksjonssystemet
- **Mellomlagring:** Komponenter mellomlagres løst i bulk med poser eller større beholdere
- **Vision-systemer** er en ressurs, men det kreves forståelse. Utstyret blir lett forstyrret av endrede lysforhold, støv og gjenskinn. Hos KA har de spesielt erfaring med at gjenskinn skaper store problemer. Som følge av dette erstattes i februar 2017 enkelte av Mikron sine matesystemer for star washere som er basert på vision med bollematere
- **Kraftbehov:** KA sine produkter er lette, og under montasjen er det sjeldent behov for høye krever. Unntaket er montasje av coneelementer, støtterør og manifolder
- **Kvalitetskontroll** er en svært viktig del av produksjonen. Hos KA har det vært utfordringer knyttet til at kontrollsystemene vraker koblinger som egentlig er riktige. Systemene er svært følsomme og kontinuerlig kontroll og justering er nødvendig. Ved bruk av datainnsamling og machine learning er det mulig å lage et system som selv justerer og oppdager forandringer i produksjonen og motarbeider vraking av «gode» produkter. Et mulig forbedringspotensial er dessuten å sortere vrakede komponenter med tanke på gjenbruk
- **Kontrollprinsippet** hos KA sier i dag at alle montasjesteg skal kontrolleres *etter* gjennomføring, men hvorfor ikke kontrollere i sanntid for å aktivt forhindre feilproduksjon? Et eksempel er å lage griperer med innebygde sensorer som registrerer om en komponent er grepet eller ikke. I dag vil griperen gripe blindt uten noe form for registrering, og etter at montasjesteget er gjennomført vil kontrollsystemet sjekke om komponenten er blitt riktig montert. Når systemet registrerer at en komponent ikke er «riktig montert» vil produksjonen stoppe i frykt for at en komponent er plassert feil. Realiteten er at komponenten ikke ble grepet i utgangspunktet og det er ingenting som hindrer videre produksjon. Dette er en «smartness» som produksjonssystemet mangler; en intelligens som forstår *hva* som går galt

- Hoveddelen av kvalitetskontrollen i den manuelle montasjen er rent visuell, og i stor grad basert på montørens eget skjønn
- Montasjeavdelingen består i dag av et stort antall ulike styringssystemer og tekniske løsninger. Det er ingen definert standard for hvilke løsninger som skal benyttes
- Koblingsklyser monteres i dag utelukkende manuelt
- Det totale produksjonsvolumet av ulike produkter produsert i små serier er relativt stort. I tillegg monteres det også koblingsklyser og manifolder manuelt

# Kapittel 5

## Design av en lavvolum montasjecelle

I dette kapitlet bestemmes først kriterier og designprinsipper for en fleksibel montasjecelle rettet mot produksjon av produkter med lave volum. Deretter presenteres ulike generelle konsepter som blir diskutert og vurdert. På bakgrunn av vurderingen er det designet en spesifikk produksjonscelle som utfører montasje av swiveler på KA sine ulike koblingshus. En økonomisk analyse av montasjecellen er også gjennomført.

*Som grunnlag for løsningene i dette kapitlet er faktorene presentert i kapittel 4.1 og 4.7, samt erfaringene fra tidligere prosjekter (kapittel 2.5) svært sentrale. Teori presentert i kapittel 2 er selvsagt også viktig input til utviklingen av montasjecellen.*

### 5.1 Praktiske kriterier og begrensninger




Montasjecellen skal utføre montasjestegene beskrevet i de neste delkapitlene. I tillegg må montasjen utføres i tråd med montasjebegrensninger beskrevet i kapittel 4.1, 4.7 og 2.5.

#### 5.1.1 Produktvarianter

I følge oppgaveteksten skal det utvikles en montasjecelle for montasje av KA sine lavvolumprodukter. Som følge av at KA har lave volum på enkelte produkter i alle de ulike produktgruppene (New Line, Integral, Threadless, Swivel, Bulkhead, KAtridge og byggeklosser) medfører dette at montasjecellen må kunne montere alle KA sine ulike produktgrupper. Hver produktgruppe har et stort antall ulike varianter, og det medfører at montasjecellen må takle et nærmest ubegrenset variantantall. For å illustrere noen av de ulike produktene vises en liten del av KA sin produktkatalog i figur 5.1.




GB: ABC New Line Push-in Coupling  
DE: ABC New Line Steckverbinder

FR: ABC New Line Union Mâle  
IT: ABC New Line Raccordo ad innesto rapido

Article no.	T	D	L	Version	Support sleeve			
901 06 010	6x1	M10x1	24	1	black	16	200	20
901 06 012	6x1	M12x1,5	23	1	black	18	170	25
901 06 014	6x1	M14x1,5	16	2	black	20	150	26
901 06 016	6x1	M16x1,5	12	2	black	22	175	29
901 06 022	6x1	M22x1,5	12	2	black	28	100	55
901 06 004	6x1	M12x1,5K	22	2	black	16	150	35
901 06 049	6x1	1/8" - 27 NPTF	23	1	black	16	100	21
901 08 010	8x1	M10x1	26	1	black	18	150	24
901 08 012	8x1	M12x1,5	25	1	black	18	150	28
901 08 014	8x1	M14x1,5	25	1	black	20	150	33
901 08 016	8x1	M16x1,5	17	1	black	22	150	30
901 08 022	8x1	M22x1,5	13	2	black	28	100	52
901 08 059	8x1	G1/8"		1	black	17	200	22
901 08 060	8x1	G1/4"	25	1	black	20	100	32
901 08 070	8x1	R1/4"	24	1	black	18	100	28
901 10 012	10x1	M12x1,5	29	1	light grey	20	100	34
901 10 014	10x1	M14x1,5	29	1	light grey	20	100	38
901 10 016	10x1	M16x1,5	28	1	light grey	22	90	41
901 10 022	10x1	M22x1,5	20	2	light grey	28	70	56
901 10 112	10x1,25	M12x1,5	29	1	black	20	100	34
901 10 116	10x1,25	M14x1,5	28	1	black	22	90	41
901 10 122	10x1,25	M22x1,5	20	2	black	28	80	56
901 10 212	10x1,5	M12x1,5	29	1	dark grey	20	100	34
901 10 216	10x1,5	M16x1,5	28	1	dark grey	22	90	41
901 10 222	10x1,5	M22x1,5	20	2	dark grey	28	80	56
901 12 012	12x1,5	M12x1,5	30	1	black	22	80	39
901 12 016	12x1,5	M16x1,5	30	1	black	22	75	43
901 12 022	12x1,5	M22x1,5	19	2	black	28	75	50
901 12 061	12x1,5	G3/8"	30	1	black	22	75	44
90114022	14x2	M22x1,5	23	1	black	28	50	47
901 15 016	15x1,5	M16x1,5	33	1	black	28	50	64
901 15 022	15x1,5	M22x1,5	23	2	black	28	60	54
901 16 016	16x2	M16x1,5	33	1	black	28	50	62
901 16 022	16x2	M22x1,5	30	1	black	28	50	66

GB: Bulkhead with ABC-NewLine  
DE: Schottstutzen mit ABC-NewLine

FR: Passe cloison avec ABC new line  
IT: Passaparete con ABC New Line

Article no.	T	D1	D2	L			
909 12 016	12x1,5	16x1,5	M24x1,5	30	28	50	75
909 12 022	12x1,5	22x1,5	M24x1,5	26	28	50	71

Figur 5.1: Ulike produktvarianter av New Line-koblinger. Figuren er hentet fra KA sin offentlige produktkatalog fra februar 2016 (KA, 2016a)



Som illustrert i figur 5.1 så produserer KA i dag koblinger for montasje av rør i følgende størrelser:

- **Push-in størrelser:** 4x1 mm, 6x1 mm, 8x1 mm, 10x1 mm, 10x1,25 mm, 10x1,5 mm, 12x1,5 mm, 14x2 mm, 15x1,5 mm, 16x2 mm, 18x2 mm, 1/4", 3/8", 1/2", 5/8" og 3/4"

I tillegg produseres New-Line-, bulkhead- og Swivelkoblinger med gjengeforbindelser i et stort utvalg ulike størrelser i både metriske- og inch-størrelser. Eksempelvis størrelsene:

- **Gjengeforbindelser:** M10, M12, M14, M16, M18, M22, M20, M24, M26, M28, 1/8" -27, 1/4" -18, 3/8" -18 med flere

Foruten New Line har alle KA sine koblinger dessuten hurtigkoblingsfunksjonalitet med swiveler i standardstørrelsene small, regular eller heavy duty. For KARtridge-koblingene finnes det tre andre standardstørrelser, men også her benyttes benevnningen small, regular og heavy duty. I tillegg lages det ulike koblingshus for alle de forskjellige produktgruppene. I dag produserer KA *925 ulike produkter*, men stadig nye varianter kommer inn i produksjonen for å tilfredstille ulike kunders ønsker.

En oppramsing av de ulike montasjestegene og komponentene som inngår i montasjen er vedlagt i vedlegg B.2

### 5.1.2 Fremtidens montasjekrav hos KA

Å forsøke og inkludere fremtidige designkrav i dagens designprosess er svært krevende, men det kan medføre at produksjonssystemet er mer robust når endringer oppstår i fremtiden. Produkter har gjerne en «livssyklus» som starter med en innkjøringsfase der produksjonsvolumet er lavt før etterspørselen øker, og det blir behov for høyere produksjonsvolum. Volumet holder seg gjerne høyt en god stund før markedene utvikler seg, og etterspørselen synker slik at produktet fases ut. Utfasingsperioden er typisk lang siden produsenten ofte er pålagt å forsyne ettermarkedet. Slik er det også med koblingene som KA produserer, og fremover ønsker KA å fase ut de gamle BRK-koblingene. Produksjonsvolumene av de gamle koblingene vil i fremtiden reduseres slik at det i prinsippet blir økonomisk lønnsomt å flytte produksjonen til mer fleksible celler, og om ett år er det kanskje ønsket å inkludere BRK-koblinger i montasjecellen som designes i denne oppgaven. Andre aktuelle fremtidige problemstillinger er nye KARtridgekoblinger, flere manifolder og sammenstilling av manifolder og KARtridge-koblinger. KA sitt inntog i USA fører dessuten til nye produktvarianter i inch-størrelse. KA opplever dessuten en økt interesse for kundetilpassede koblinger med spesielle egenskaper som sensorer, eller ferdigmonterte «koblingsklyser». Det vil si at byggeklosser og koblinger blir ferdigmontert av KA slik at kunden bruker mindre tid ved sin montasjelinje. Som fortalt i kapittel 2 øker interessen for kundetilpasning, og dette stiller høye krav til produksjonssystemet.

## 5.2 Designprinsipper

Den nye montasjecellen må designes etter de praktiske begrensningene presentert i kapittel 5.1 og 4.1. I tillegg er det valgt visse kriterier som skal vektlegges under designprosessen slik at riktige designvalg gjøres.

For selve montasjeprosessen har jeg valgt at kvalitet, robusthet og fleksibilitet vektlegges. Når en ser montasjecellen i sammenheng med resten av produksjonssystemet skal dessuten skalerbarhet, flyt og arealbruk vektlegges. Lean-filosofien er en grunnstein for både montasjeprosessen og produksjonsanlegget som helhet. De ulike designprinsippene begrunnes i de kommende punktene.

*Krav til en maksimal syklustid eller kostnad på anlegget defineres ikke. Det gjøres fordi de økonomiske designprinsippene blir en effekt av fokuset på lean. Den fleksible cellen er dessuten rettet mot produksjon av de spesielle produktene som ikke kan lages i høyvolum-sautomatene, og en høyere produksjonskostnad kan derfor aksepteres.*

### Montasjeprosessen designprinsipp

#### 1. **Fleksibilitet**

- Fleksibilitet er ikke bare et prinsipp som må følges, men en forutsetning for hele montasjeprosessen som skal utvikles i denne oppgaven. Automatiserte montasjemaskiner for spesifikke produkter finnes allerede hos KA, men de håndterer ikke et stort antall ulike produkter eller fremtidige krav til kundetilpasninger. Det er fleksibiliteten i denne løsningen som skiller seg fra eksisterende produksjonsutstyr

#### 2. **Kvalitet**

- KA ønsker å prioritere sikkerhet, og de har som nevnt i kapittel 1 en «Triple 0 policy» som sikter mot null ulykker, null miljøpåvirkninger og null forstyrrelser. En slik strategi krever at produktene produseres uten feil; hver eneste gang. Denne strategien er i tråd med bilbransjens høye kvalitetskrav, og kvalitet er derfor valgt som et viktig designprinsipp. Montasjecellen skal sørge for at hvert eneste ferdige produkt KA leverer til kunden er kvalitetssikret og uten feil

#### 3. **Robusthet**

- Når nye produksjonssystemer utvikles fokuseres det ofte på å klare én spesifikk oppgave for ett bestemt tilfelle, men om løsningen verifiseres eksperimentelt betyr det ikke at systemet vil fungere i en mer krevende industriell setting. Hos KA vil systemet måtte takle små forandringer i komponentene som skal monteres, utstyr som slites og omstillinger som potensielt endrer

noe av utstyret. En løsning som ikke er designet for å takle slike utfordringer vil ikke prestere på det nivået som kreves. Robusthet er derfor valgt som et sentralt designprinsipp. Produksjonsprosessen skal designes for å være robust slik at systemet kan takle uforutsette hendelser uten å stoppe. For en ny type fleksibel celle kan det eksempelvis godtas at noen prosent av koblingene monteres feil, så lenge feilen oppdages, produktet vrakes, og produksjonen fortsetter uforhindret

## **Designprinsipp for fabrikklayout og materialflyt**

### **1. Skalerbarhet**

- KA ser økt etterspørsel i markedet, og spesielt for kundetilpassede produkter. Det betyr flere spesialprodukter med lavere volum; noe som er nøyaktig det denne oppgaven forsøker å løse. Designet utviklet i denne oppgaven bør være laget for å kunne skaleres ettersom behovet endrer seg slik at produksjonssystemet kan levere akkurat det kunden ønsker

### **2. Flyt**

- Den automatiserte produksjonen hos KA har tidligere fokusert mer på syklustid og kvalitet enn flyt i selve fabrikk. Dette fører til at materialtransport og logistikkdelen av produksjonen ikke er optimal; flyten bør forbedres. Det innebærer å se på produksjonssystemet som helhet, og være klar over montasjecellens innvirkning på resten av systemet

### **3. Arealbruk**

- De automatiserte produksjonssystemene hos KA tar stor plass, og å minimere arealbruk har tidligere ikke vært prioritert. Dagens situasjon er annerledes; med lite areal ledig og høye arealkostnader. Det er derfor et mål å minimere nødvendig produksjonsareal

## **Lean**

Montasjecellen skal designes med utgangspunkt i verdier fra lean som er beskrevet i kapittel 2.1. Spesielt viktig er:

- Verdien av produktet bestemmes av kunden
- Alle prosesser som ikke bidrar til å skape verdier for kunden betegnes som sløsing

I en montasjeprosess betyr dette at alle steg som monterer en ny komponent på produktet, eksempelvis o-ringer eller silikon, tilfører produktet verdi. Transport og unødvendig bevegelse av en eventuell robot vil derimot være sløsing, og bør unngås. En slik

tankegang kan brukes videre til å sørge for at eventuelle roboter ikke må vente på hverandre, at roboten ikke må utføre uforholdsmessig store bevegelser, eller at koblinger må gripes flere ganger enn det som egentlig er nødvendig. Andre former for sløsing er venting og feilproduksjon. Et prinsipp for å motvirke dette er jidoka; robust og kvalitetssikker produksjon som kontinuerlig overvåker prosessen og sørger for at defekter unngås.

*Å forhindre sløsing skal være en grunnstein i designutviklingen.*

## 5.3 Overordnet konseptdesign

Med bakgrunn i kriteriene presentert i kapittel 5.1 og 5.2 diskuteres ulike generelle løsninger som kan tilfredstille KA sitt behov. Designutviklingen har pågått parallelt med studie av montasjeprosessene hos KA, samtaler med ansatte hos KA og Sintef, erfaringsoverføringer og ulike idémyldringer. Informasjonen jeg har tilegnet meg er bakgrunnen for de ulike konseptene presentert i kapittel 5.3. I kapittel 5.4 blir kvaliteter ved de ulike konseptene vurdert opp mot hverandre, og i kapittel 5.5 designes en spesifikk montasjecelle i detalj.

Utifra litteratur og erfaringer beskrevet i kapittel 2 er det besluttet å benytte industriroboter i alle de ulike konseptene. Industriroboters grunnleggende fleksibilitet gir større muligheter enn eksempelvis standard automatiseringsløsninger med enkle pneumatiske aktuatorer. For å oppnå den nødvendige fleksibilitet er det i tillegg benyttet visionsystemer og kraftsensorer.

### 5.3.1 Konsept 1 – en generisk celle

Det mest grunnleggende konseptet er en generell montasjecelle uten noe form for spesialisering. Utifra erfaringer fra tidligere prosjekter bør cellen baseres på to samarbeidende industriroboter, da disse klarer å løse de fleste montasjestegene. Cellens øvrige oppsett, og arbeidsmetodikken kan designes svært ulikt. Nedenfor presenteres noen ulike oppsett:

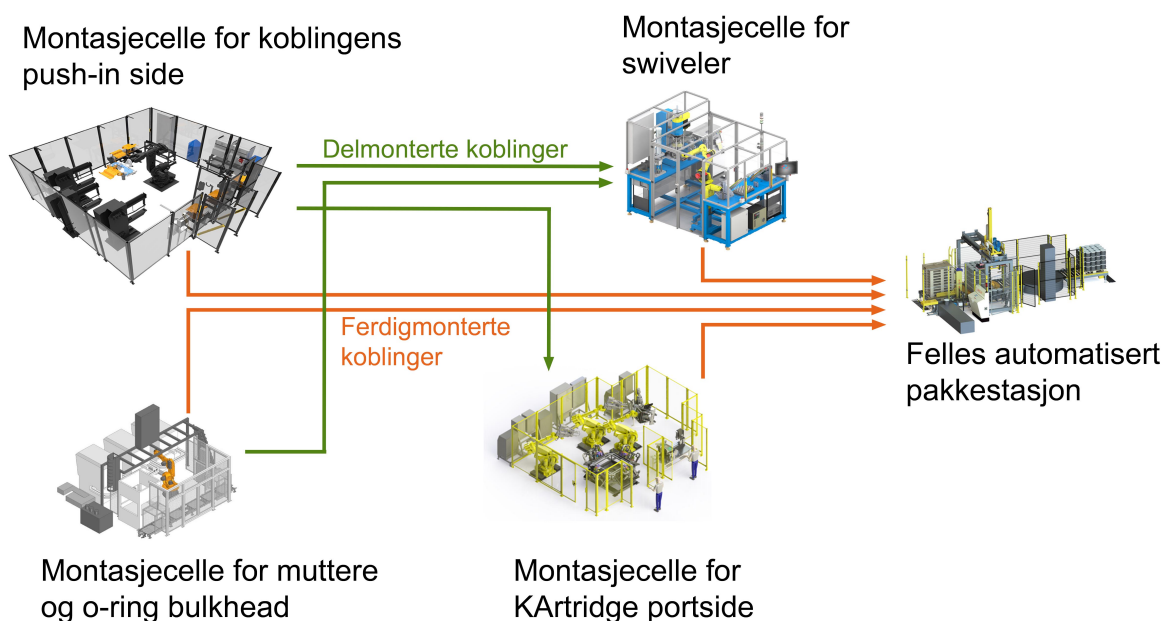
1. Generelle fleksible materer lar roboten plukke komponenter ved hjelp av et visionssystem. Montasjen foregår uten hjelp av fiksturer ved at én av robotene holder koblingshuset og den andre roboten plukker og monterer komponentene. Det vil være nødvendig med en ekstern presse for å utføre kraftintensive montasjesteg
2. En annen løsning er å benytte generelle pallettfiksturer slik at flere koblingshus kan monteres samtidig og antall verktøybytter reduseres. En robot plukker først koblingshus fra en fleksibel mater og plasserer komponentene på paletten. Den andre roboten kan enten arbeide parallelt med den første, eller i serie ved at flere palletter er i bruk. Ved serieproduksjon kan det lages en pallettbane for å transportere pallettene mellom robotene



montasjeprosesser. Swiveler er eksempelvis standardisert med kun tre ulike størrelser, og denne montasjeprosessen er identisk for alle koblinger med en swivelfunksjonalitet. Den varierende faktoren er de ulike koblingshusene; for eksempel ulike Swivel- og Threadless-koblinger, eller byggeblokker. Det samme gjelder for muttere og ytre o-ringer til bulkheadkoblinger. Antallet ulike muttere og o-ringene er begrenset, men koblingshusene kan i stor grad variere. Etter å ha analysert de ulike montasjeprosessene er det fire ulike hovedkategorier som skiller seg fra hverandre:

1. Montasje av push-in side
2. Montasje av swiveler for byggeblokker, Swivel- og Threadlesskoblinger
3. Montasje av KARtridge portside
4. Montasje av muttere og ytre o-ringer på bulkheadkoblinger

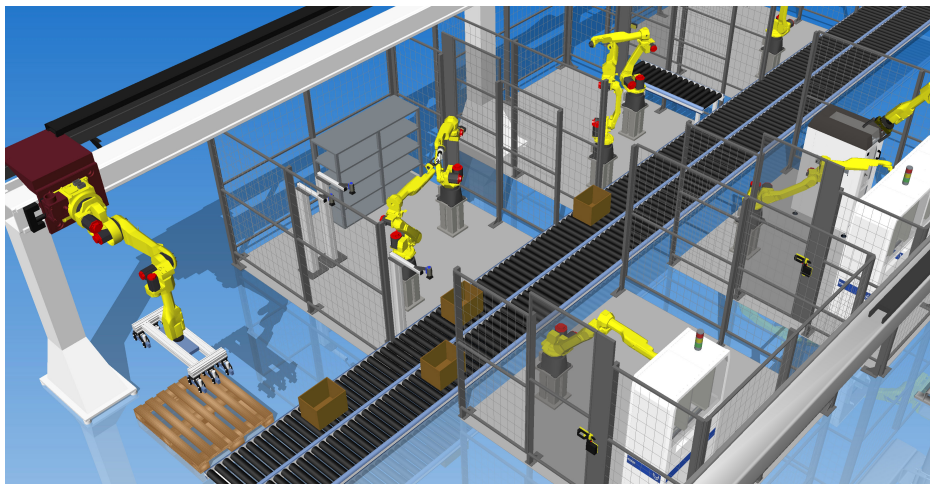
Denne inndelingen danner et godt grunnlag for å dele opp montasjen etter de ulike, nødvendige montasjestegene. Det kan lages flere montasjeceller som er spesialiserte mot bestemte montasjeprosesser, men som kan takle alle koblingshus. Prinsippet er illustrert i figur 5.3. Å spesialisere montasjecellene gjør det enklere å perfektionere de ulike montasjeprosessene for å oppnå mer robust, kvalitetssikker og effektiv produksjon. Likeså reduseres behovet for nødvendig spesialutstyr i hver enkelt celle, og en høyere utnyttelsesgrad oppnås. Et konkret eksempel er at nødvendige verktøybytter mest sannsynlig reduseres for et system som er spesialisert mot færre operasjoner.



Figur 5.3: Illustrasjon av konseptet med differensierte stasjoner. Materialflyten mellom de ulike montasjecellene illustreres med piler. Inngående komponenter vises ikke

Skal montasjeprosessen fordeles på ulike montasjeceller øker transportbehovet. Eksempelvis vil koblinger som besitter både en push-in-side og en swivel måtte prosesseres

av to montasjeceller. En delmontert kobling må følgelig transporteres mellom de to cellene. Om mellomtransporten også gjøres med koblinger lagret i bulk må dessuten koblingshuset lokaliseres og gripes to ganger. En slik ordning setter store krav til logistikksystemet som må ha kontroll på både råvarer, halvferdige koblinger og ferdige produkter; men det gir også muligheter til å løse KA sine utfordringer med fabrikkens materialflyt. Om montasjecellene kobles sammen med et felles system for materialtransport, så blir det samtidig enklere å innføre et felles, automatisert pakkesystem for ferdige produkter. Dessuten kan materialtransporten automatiseres; i dagens produksjon hos KA foregår som kjent materialtransporten manuelt. Figur 5.3 illustrerer hvordan materialflyten vil bli med en løsning med fire ulike typer montasjeceller, og figur 5.4 gir et visst inntrykk av hvordan cellene kan kobles sammen. Den klart største flyten av delmonterte koblinger vil strømme fra montasjecellen for koblingenes push-in-side til de to montasjecellene for portsider (swivel og KArtridge portside). Push-in-siden monteres først ettersom det ikke er nødvendig med spesielle beskyttelsestiltak etter dette montasjesteget. Koblingens neste stopp; montasje av portsiden, krever derimot påføring av beskyttelseshetter, eller at koblingen plasseres i et blister. Den største andelen av produktene som monteres i cellen for muttere og o-ring til bulkhead-koblinger er ferdige etter dette steget. Også montasjecellen for swiveler har et stort antall koblinger som bare er innom denne montasjecellen. Avslutningsvis transporteres de ferdigmonterte koblingene til en felles automatisert pakkestasjon.



Figur 5.4: En visualisering av grunntanken skissert i figur 5.3. Oppsettet er ikke direkte overførbart til KA sin produksjon, men viser et oppsett med individuelle celler, felles materialtransport og automatisert mating av deler ved hjelp av to skinnegående roboter

Selve montasjenprosessen i de ulike cellene vil benytte seg av ulike løsninger presentert i kapittel 5.3.1 der den generiske cellen ble diskutert.

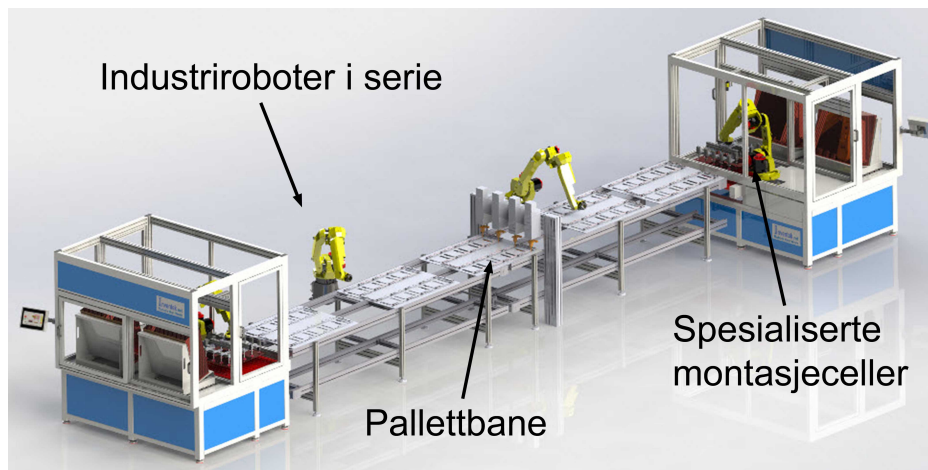
## Sentrale egenskaper

- Konseptet hovedtanke er å dele montasjeprosessen slik at montasjesteg som naturlig hører sammen gjøres på ett sted. Montasjen deles opp etter hvilke montasjesteg som skal utføres, og ikke på bakgrunn av hvilket produkt som produseres slik som dagens produksjon gjør
- De ulike arbeidsoppgavene foregår i separerte montasjeceller. Hver celle er designet utifra sine individuelle arbeidsoppgaver og kan være svært ulike. De kan være forskjellige med tanke på antall roboter, gulvareal og bruk av fiksturer og eventuelle eksterne maskiner
- De adskilte montasjecellene kan benytte seg av et felles system for materialtransport, og det kan lages en felles stasjon for pakking av ferdigkomponenter. Mulige løsninger er portalkraner som beveger seg over montasjecellene, eller industriroboter montert på lineærføringer. Det finnes også transportsystemer som benytter AGVer, eller ulike typer transportbånd
- Nedetid hos én av montasjecellene fører ikke til stopp hos i de andre systemene ettersom montasjecellene arbeider individuelt. Ved intern materialflyt tar det automatiserte materialtransportsystem seg av eventuelle produkter i kø ved bruk av WIP-lager

### 5.3.3 Konsept 3 – sammenkoblede montasjeceller

Konsept 2 med differensierte stasjoner har som prinsipp at stasjonene arbeider uavhengig, men med «sammenkoblede montasjeceller» kan cellene settes til å arbeide i serie mot et smartere transportsystem. Eksempelvis en pallettbane med fiksturer som transporterer halvferdige koblinger; figur 5.5 gir et inntrykk av konseptet. Ved bruk av palletter går ikke verdifull informasjon om koblingens orientering og lokasjon tapt for koblinger som må transporteres mellom de ulike montasjecellene. Eksempelvis en Threadless-kobling som krever både montasje av push-in-siden og deretter swivelen. Ettersom systemet må takle svært mange produktvarianter må pallettbanen være fleksibel slik at ulike palletter kan bevege seg mellom ulike stasjoner til ulike tider. Pallettbanen behøver ikke å transportere ferdige produkter, men vil bare ta koblinger som behøver å være innom flere stasjoner; blant annet KArtridge-, threadless-, og New Line-koblinger. Et stort risikomoment med et slikt system er fiksturene. Et fleksibelt system som avhenger av fiksturer er i utgangspunktet noe selvmotsigende ettersom et slikt mekanisk system i utgangspunktet er lite fleksibelt. Løsningen avhenger av et design som klarer å gjøre fiksturene generiske slik at de kan benyttes på mange ulike koblinger. Eventuelt med en modularitet som gjør det enkelt å endre fiksturene. Samtidig må systemet være svært nøyaktig, og det vil derfor mest sannsynlig være svært utfordrende å realisere denne løsningen til en forsvarlig pris.





Figur 5.5: En svært generell og forenklet illustrasjon av montasjeceller arbeidende i serie mot en pallettbane. Figuren er hentet fra <http://www.inventekengineering.com/>

## 5.4 Vurdering av de ulike konseptene

Konsept 1 sitt største fortrinn er cellens fokus på fleksibilitet, og det generelle designet. Om KA selv bygger cellen og har kunnskap om de tekniske løsningene vil denne konseptet være enkelt å justere for nye produkter. I tillegg blir koblingen fullstendig montert i én celle slik at en unngår delmontasje. Dette reduserer logistikkbehov, og i tillegg antall ganger en kobling må lokaliseres, gripes og håndteres. Dessuten reduseres risikoen for tilsmussing i løpet av prosessen og behovet for mellomlagring. Systemets kanskje største ulempe er at mye utstyr må samles i én celle for å klare alle de ulike montasjeste-gene, og at utnyttelsesgraden derfor blir dårlig. Effektiviteten vil mest sannsynlig også være dårligere enn for mer spesialiserte montasjeceller ettersom designet i større grad blir generisk.

Om KA produserte komponenter med levetid på bare få år, og med svært lave produksjonsvolum, så ville det første konseptet med en svært lite spesialisert celle mest sannsynlig tilfredsstilt behovet for en fleksibel montasjecelle. Situasjonen hos KA er imidlertid at produktene er i produksjon i lang tid, og det totale volumet av produkter som produseres i små serier er relativt høyt. For å illustrere, så ble det i følge produksjonsdata fra produksjonsplanlegger Mona Haugnes montert mer enn 170 ulike artikler manuelt internt hos KA, og hos ATS i løpet av januar 2017. Om en regner med at hvert produkt har et årlig volum på 50 000; som i KA sin målestokk er lavvolum, så vil årlig produksjonsvolum av 170 ulike artikler totalt være 8,5 millioner. Dette er naturlig nok et meget grovt estimat, men konklusjonen er at lavvolumsproduktene i sum utgjør et betydelig kvantum; og en viss spesialisering av de ulike montasjecellene kan forsvares for å oppnå mer effektiv og robust produksjon. Det krever selvfølgelig at hver montasjecelle oppfyller nødvendig fleksibilitet innenfor sitt produktområde.

Differensierte montasjestasjoner er utgangspunktet for både konsept 2 og 3. Spørsmålet er hvordan de ulike cellene skal differensieres. KA deler i dag høyvolumsproduksjonen

etter ulike produkt og produktgrupper. Det vil si at produksjon av gamle BRK-koblinger er organisert i et bestemt område, New Line-koblinger er plassert et annet sted mens komposittkoblinger monteres for seg selv. I tillegg er de ulike automatene bygget for å produsere spesielle størrelser av de ulike produktgruppene. New Line og KARtridge har eksempelvis begge en push-in-side, men disse monteres i to ulike celler der begge cellene må ha utstyr for push-in-montasje. For å redusere antall nødvendig utstyr, men samtidig spesialisere de fleksible cellene mener jeg det er bedre å organisere produksjonen etter de ulike *montasjeprosessene*. Det betyr at prosesser som naturlig hører sammen foregår på samme sted. Ved å gjøre dette reduseres det totale behovet for utstyr. For å illustrere så vil det med en prosessorientert layout bare være behov for at én celle kan montere push-in-komponenter. Om en i motsetning organiserte produksjonen etter ulike produkttyper ville både cellen for KARtridge, New Line, Threadless og Integral ha behov for utstyr til montering av push-in.

## **Delmontasje**

Ved å differensiere montasjecellene må enkelte produkter monteres i to steg. Med mindre den delmonterte koblingen mellomlagres i blistere som sørger for nøyaktig posisjonering under transporten må koblingshuset lokaliseres en ekstra gang ved den avsluttende montasjen. Mest sannsynlig vil bulklagring mellom prosessene være det mest aktuelle på grunn av plassbehovet til blisterner. Blistere må i tillegg spesialproduseres for de ulike produktene. Dette er ikke spesielt fleksibelt. Å unngå unødvendig lokalisering av delmonterte koblinger er hovedargumentet for konsept 3. Med en fleksibel pallettbane mellom de ulike cellene kan delmonterte koblinger transporteres raskt og nøyaktig uten at posisjonsinformasjonen går tapt. Dessverre vil løsningen mest sannsynlig bli svært dyr og kompleks som følge av KA sitt store produktspekter. Palletbanen gir dessuten lite rom for mellomlagring og bruk av buffere. Jeg mener derfor at konsept 3 ikke er en like god løsning som konsept 2.

Delmontasje, og tapet av posisjonsdata under mellomlagring, er ikke et problem om en studerer de nødvendige tekniske løsningene. De ulike montasjecellene må uansett løse utfordringen med å plukke koblingshus løst lagret i bulk ettersom KA i dag lagrer alle sine komponenter i bulk. Når denne utfordringen er løst, kan metoden standardiseres, og merkostnaden for å benytte seg av metoden også på delmonterte koblinger vil derfor være lav. Etter erfaringer fra tidligere prosjekter, litteratur og input fra ansatte hos KA mener jeg konsept 2 er den beste løsningen. Delmontering muliggjør et effektivt og robust produksjonssystem i kombinasjon med nødvendig fleksibilitet. I tillegg gir konseptet større muligheter for å skalere produksjonen og forbedre flyten slik som det ble definert i designprinsippene i kapittel 5.2. Det økte transportbehovet ansees som en liten pris å betale for å kunne kombinere fleksibilitet med robust, kvalitetssikker og effektiv montasje.

## 5.5 En montasjecelle for swiveler

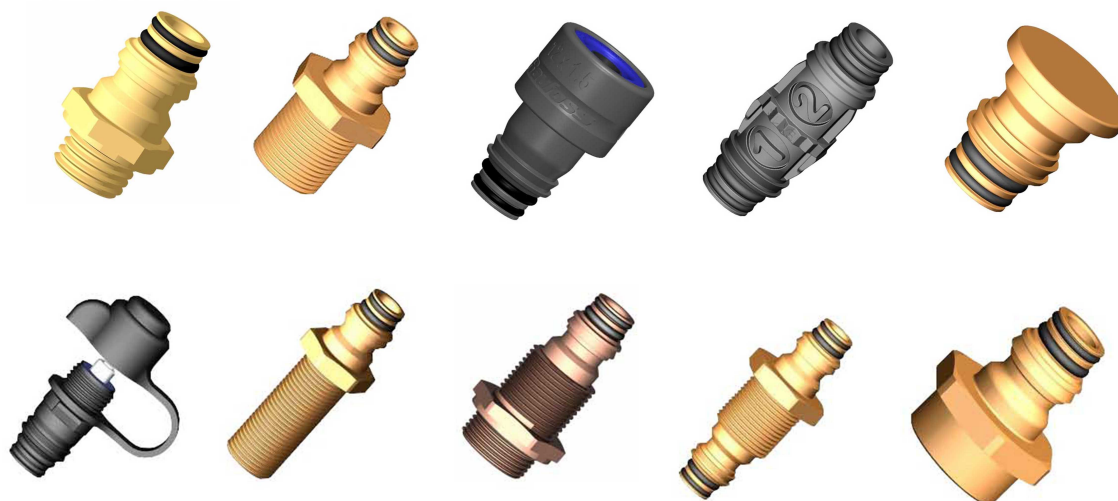
I dette delkapitlet blir det foreslått ulike design, diskutert tekniske løsninger og gjort en økonomisk vurdering av en montasjecelle for koblinger med en swivel. Cellen er en del av konsept 2, diskutert i kapittel 5.3.

Som nevnt blir mer enn 170 ulike produkter montert manuelt hos KA, men hvilken av de fire ulike cellene som inngår i konsept 2 bør realiseres først? Med bakgrunn i den manuelle montasjekostnaden vil de mer kompliserte prosessene som KArtridge port-side og push-in-siden være dyrest, og derfor mer attraktive å automatisere. Med tall fra produksjonsplanlegger Mona Haugnes viser det seg imidlertid at det manuelt monteres store mengder kontramuttere og ytre o-ringer i tillegg til swiveler. På bakgrunn av de høye manuelle produksjonstallene mener jeg at fokusområdet bør være å først automatisere disse to montasjestegene. Montasjeprosessen for bulkhead- og swivelkoblinger er enklere ettersom komponentene som inngår begrenser seg til ulike o-ringer, silikon, beskyttelseshetter og kontramuttere. Det gir mening å starte utviklingen av fleksible produksjonssystemer for de enklere prosessene slik at produksjonen kan realiseres raskere for å frigjøre manuelle ressurser. Dessuten kan nyttige erfaringer fra den initiale montasjecellen bidra til en bedre utvikling av de mer komplekse montasjesystemene. Som det er forklart tidligere i kapittel 5 er det ønskelig å separere montasje av muttere fra montasje av swiveler. I dette prosjektet velges det å gå videre med en montasjecelle for swiveler.

Som presentert i kapittel 3 har KA 3 ulike standard portstørrelser; small, regular og heavy duty, og hver port har 2 ulike o-ringer, og en egen beskyttelseshette. I figur 5.6 og figur 6.1 vises dessuten et tilfeldig utvalg koblinger med swiveler. I vedlegg B.3 vises dessuten en oversikt over utvalgte produkter med swiveler, artikkelnummer, og månedlig produksjonsvolum.

*Cellen må designes etter de overordnede kravene definert tidligere i kapittel 5; kvalitet, robusthet, fleksibilitet, skalerbarhet, flyt og lean.*

*Designet utviklet i dette kapitlet er laget ved hjelp av 3D-modelleringsprogrammet SolidWorks, og figurene er rendret i KeyShot. I løpet av designutviklingen er dessuten simuleringsprogrammet Visual Components benyttet. Diskusjonen i kapitlet tar utgangspunkt i den første designløsningen vist i figur 5.7, men det presenteres også alternative layout, og dessuten en alternativ montasjecelle til slutt i kapitlet.*

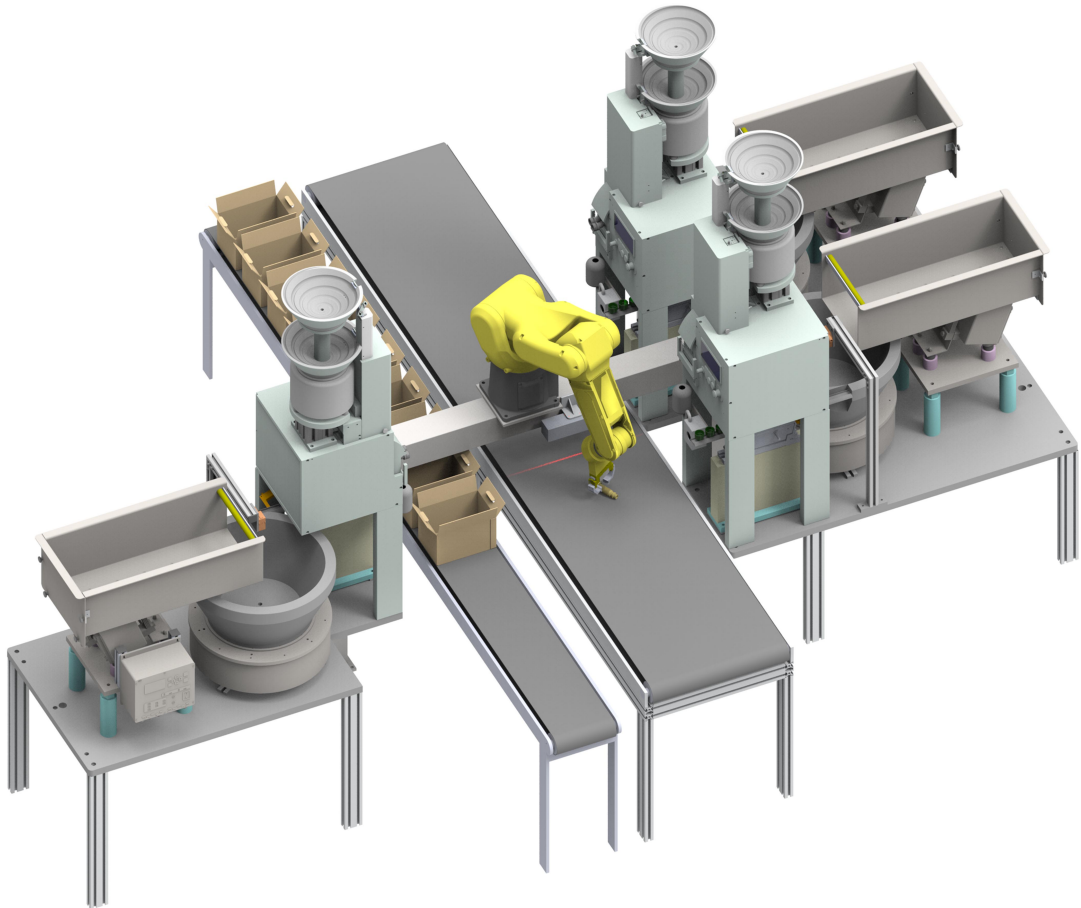


Figur 5.6: Et tilfeldig utvalg koblinger fra KA med swiveler i ulike størrelser. Beskyttelseshetter er ikke vist. Figurene er hentet fra <http://www.electromaintenance.fr/eng/>

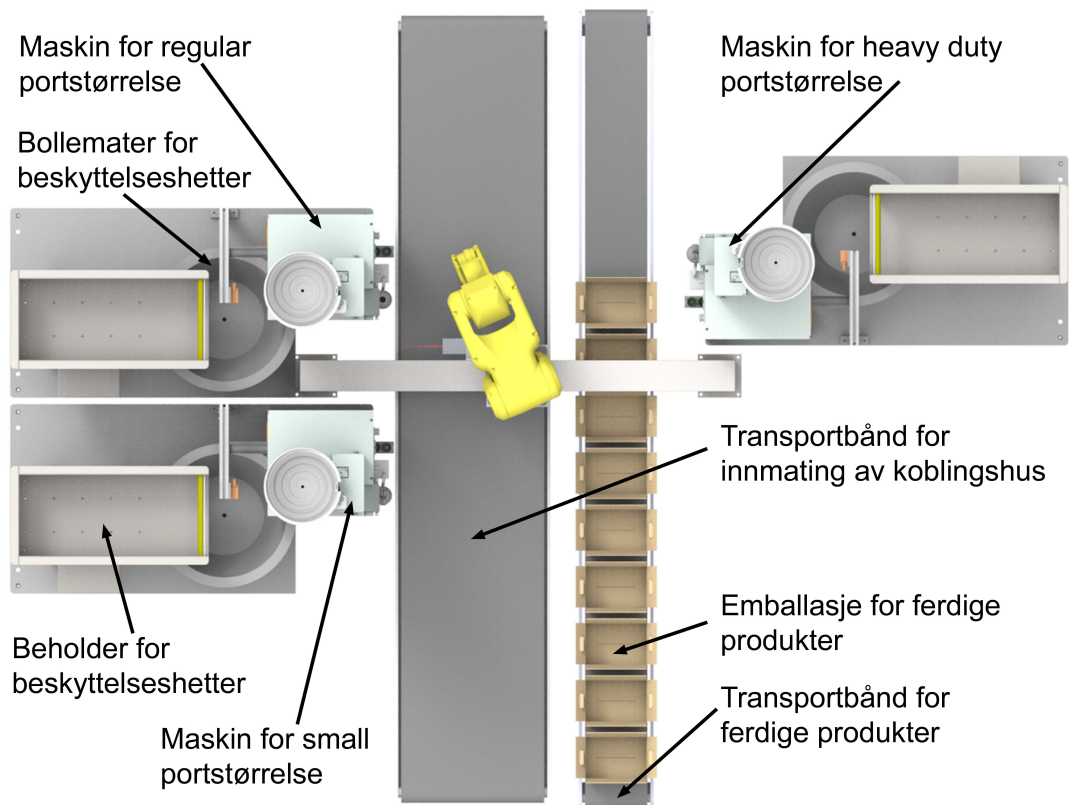
### 5.5.1 Design

En illustrasjon laget i SolidWorks av en mulig montasjecelle for swiveler vises i figur 5.7, 5.8, 5.9 og 5.10. Cellen består av én industrirobot med tilhørende griper, et visionsystem for lokalisering, tre maskiner som gjør det mulig for roboten å montere o-ringer, beskyttelseshette og påføre silikon, og dessuten et transportbånd for ferdigvarer og et transportbånd for koblingshus. Det er viktig å poengtere at modellen er laget for å visualisere et konsept, og de ulike komponentene er derfor ikke fullstendig optimert for oppgaven. Eksempelvis er de to transportbåndene bare en visualisering for et mulig matesystem, og ikke nødvendigvis den endelige optimale løsningen.

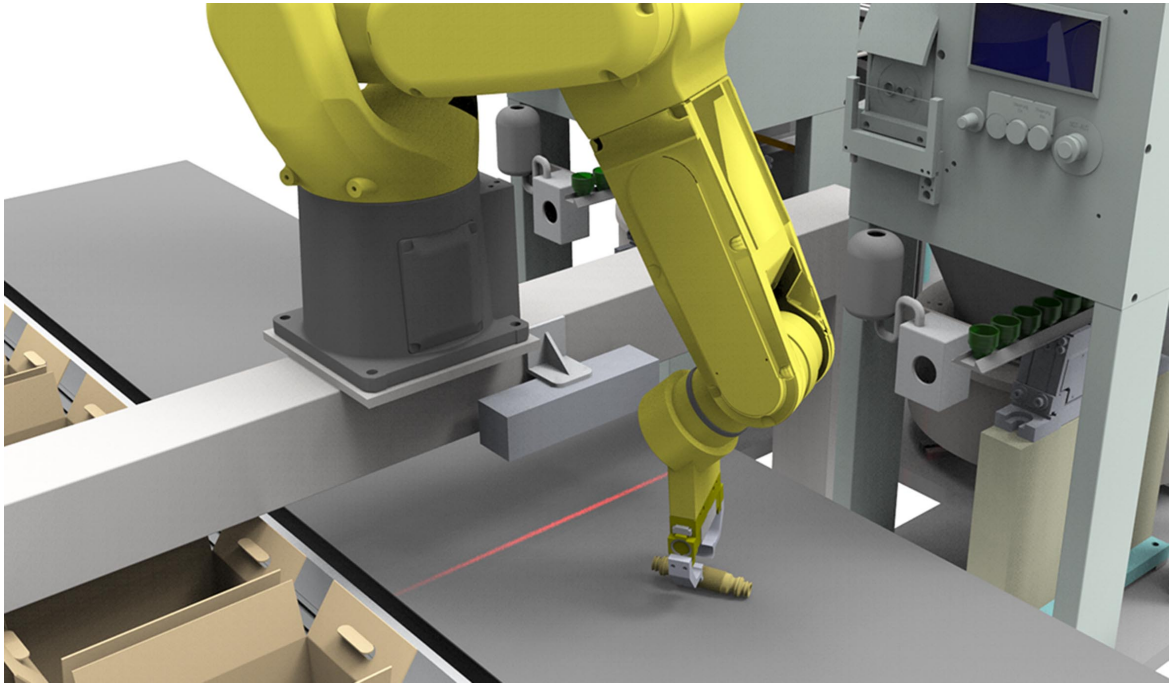
Montasjecellen produserer batcher av koblinger. Koblingshus mates inn med det store transportbåndet og blir lokalisert av en laserscanner (se figur 5.9). Roboten griper det lokaliserte huset og benytter seg av en Ohrmann-maskin for å montere swivelens 2 o-ringer. Roboten må føre koblingshuset inn i 2 ulike hull med høy nøyaktighet for å montere o-ringene. Denne montasjeprosessen forklares i detalj i kapittel 4, og er dessuten visualisert i figur 4.2a og figur 5.10. Deretter må roboten føre koblingen inn mot en spesiallaget innretning som påfører o-ringene silikon. Etter påføring av silikon kan koblingens portside presses mot beskyttelseshetten slik at denne fester seg. Beskyttelseshetter mates inn ved hjelp av en bollemater med lineærføring. Til slutt avleverer roboten den ferdigmonterte koblingen i en eske eller pose. I løpet av prosessen må det også utføres kontroll av prosessen som sikrer at koblingen er riktig montert, og produktets kvalitet er sikret.



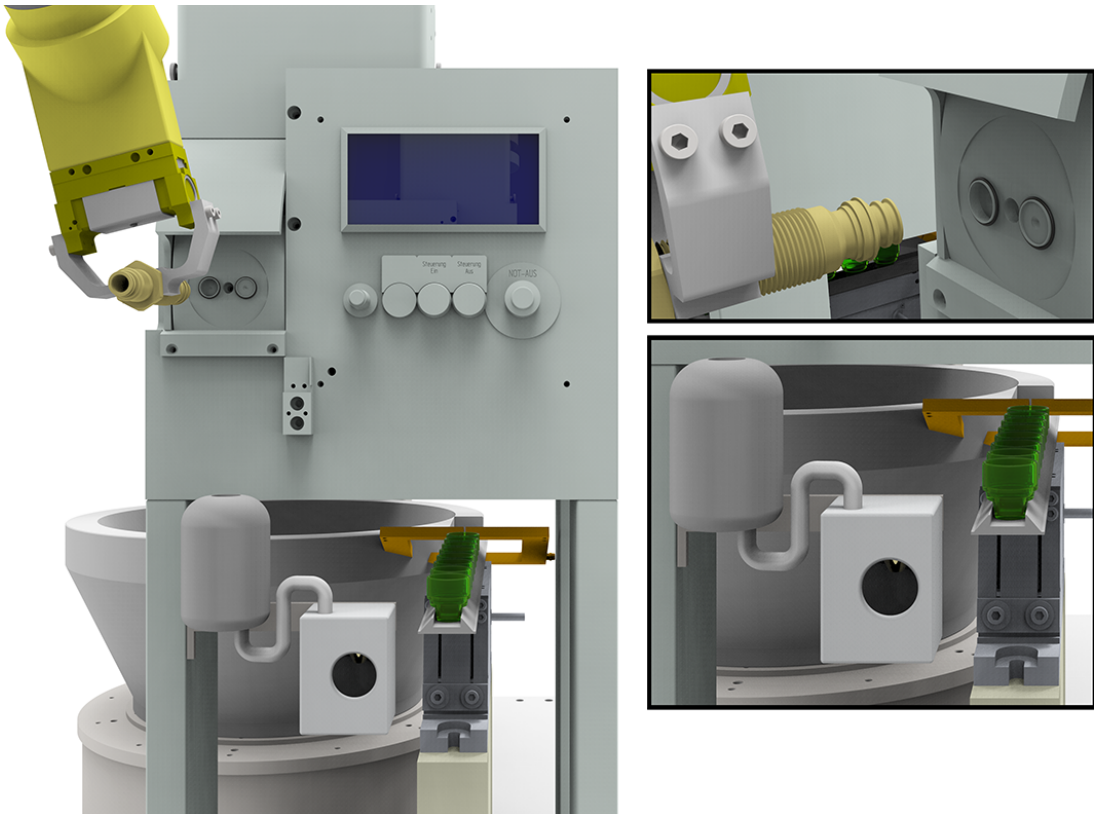
Figur 5.7: Illustrasjon av mulig montasjecelle for swiveler



Figur 5.8: Oversikt over montasjecellen for swiveler



Figur 5.9: Nærbilde av prosessen der koblingshuset lokaliseres og gripes



Figur 5.10: Nærbilde av maskin for montasje av o-ringer, silikon og beskyttelseshetter. Klargjorte o-ringer er fremhevet øverst til høyre mens det nederst til høyre fremheves silikondispenser og klargjorte beskyttelseshetter

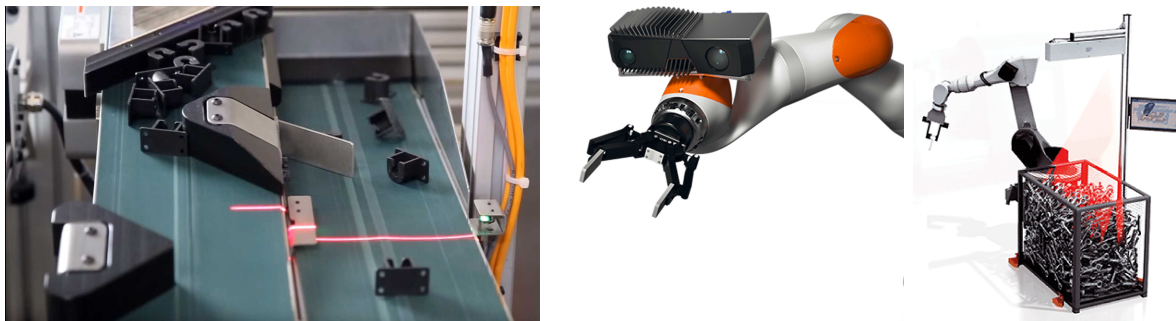
Til tross for at modellen i figur 5.7 er laget i illustrasjonsøyemed er ikke cellens layout tilfeldig. Designet bygger på et svært viktig faktum; tre standardiserte og definerte portstørrelser skal monteres på et stort antall ulike koblingshus. *Cellens krav til fleksibilitet ligger i å takle de ulike koblingshusene.* De ulike husene varierer både i størrelse og form; og produktområdet spenner fra svært små og lette 6 grams kompositthus laget for 4 mm rør til store messinghus med en vekt opp mot 200 gram. Løsningen er et system der robot, vision-system, griper og smart software sammen sørger for montasjecellens nødvendig fleksibilitet. Måten å utføre selve monteringen av o-ringer, silikon og beskyttelsehetter er derimot overlatt til tre spesialmaskiner. Argumentene for å gjøre dette, er å sette fokuset på robusthet, kvalitet og effektivitet ettersom behovet for fleksibilitet er begrenset. Swivelene finnes bare i tre ulike størrelser, og antall komponenter som maskinene må håndtere vil ikke endres i fremtiden.

I tillegg til fleksibilitet og kvalitet, er krav om lønnsomhet og lean produksjon viktige designprinsipp. I praksis betyr eksempelvis fokuset på lean at roboten bør ha en størrelse som passer for oppgaven slik at den ikke er overdimensjonert. For å redusere arealbruk må cellen dessuten være så kompakt som mulig, men uten at dette går på bekostning av robotens arbeidsområde slik at cellen blir ineffektiv. Det er svært viktig å være klar over at cellens effektivitet vil avhenge i stor grad av hvor raskt roboten klarer å forflytte seg mellom de ulike stasjonene. Dette kommer av at hver enkelt stasjon har kortere syklustid enn robotens totale arbeidstid. Den begrensende syklustiden blir derfor roboten. Maskinen fra Ohrmann har eksempelvis syklustid ned mot 1,8 sek ([Ohrmann, 2017](#)). For å oppnå best mulig syklustid må robotens bevegelser optimeres. Dette kan i stor grad gjøres ved å plassere de ulike arbeidsstasjonene utifra robotens kriterier. Korte avstander er åpenbart positivt for robotens tidsforbruk, men det er dessuten svært viktig at roboten ikke må gjøre kompliserte og store rotasjonsbevegelser for å få riktig vinkling mellom blant annet koblingshus og arbeidsstasjon. Bevegelser i nærheten av singulariteter er i tillegg noe som påvirker effektiviteten negativt. Dette kan unngås ved å holde arbeidsområdet utenfor singularitetsområder. De nevnte elementene henger tett sammen med montasjecellens layout; noe som best illustreres i figur 5.8. Roboten er plassert sentralt i cellen slik at arbeidsområdet kan utnyttes til det fulle. Med tanke på å utnytte arealet best mulig er området for griping av koblingshus og avlevering av ferdige produkter plassert på et bånd som beveger seg under roboten. De tre maskinene er deretter plassert i kort avstand fra området der husene gripes. Roboten kan raskt vri seg, og presentere koblingen for montasje av o-ringer. Parallelt med designutviklingen ble Visual Components benyttet for å simulere robotens bevegelser. En enkel maskintegning i vedlegg B.5 viser sentrale størrelser ved den foreslåtte montasjecellen. Selv med de noe overdimensjonerte transportsystemene i den illustrerte cellen er totalt arealbruk bare 8,8 kvadratmeter.

## 5.5.2 Deteksjon av koblingshus

I løsningen presentert i figur 5.9 er vision-systemet illustrert med en laserscanner. Dette er en løsning som avhenger av et transportbånd som beveger koblingshuset forbi laserstrålen, eller at scanneren selv kan bevege laserstrålen over komponentene (se figur 5.11a). Bruk av en laserscanner er nødvendigvis ikke den beste løsningen, men scanneren brukes i illustrasjonen for å vise at valg av visionsystem påvirker hvordan koblingshusene kan mates inn til roboten. Innmating og lokasjon er tett knyttet sammen, og plassering av kameraet vil påvirke hvordan roboten må bevege seg. Enkelte vision-systemer krever dessuten kontrollerte lysforhold for å kunne fungere optimalt.

Som presentert i kapittel 2.3 finnes det flere ulike måter å lokalisere objekter ved hjelp av visionsystemer. Med utgangspunkt i montasjecellens design bør det være et kamera som er robust mot ytre lyskilder slik at det ikke er nødvendig å bygge inn soner der koblingshus detekteres. Med dagens design må transportbåndet bevege koblingene kontrollert forbi laserstrålen, men med små og sylindriske koblinger er det sannsynlig at koblingshusene beveger seg ved start og stopp av båndet. Det er derfor fordelaktig å utføre deteksjon når koblingshusene er stasjonære. Bruk av strukturert lys kan være en god løsning som sikrer 3D-informasjon og samtidig er robust ovenfor ytre lyskilder og gjenskinn. Et produkt som kan benyttes er kameraet «Zivid» fra den norske produsenten ZividLabs (TU, 2016c). Kameraet kan monteres på robotarmen, men i dette systemet er det mer fordelaktig om kameraet er fastmontert slik at deteksjon av nye koblingshus kan foregå parallelt med at roboten utfører montasje av o-ringer, silikon og beskyttelseshetter. Figur 5.11b viser kameraet montert på en robot.



(a) Lokalisering ved bruk av en laserscanner. Hentet fra <http://www.kinemetrix.com/> (b) Et kamera fra Zivid. Hentet fra <http://www.zividlabs.com/> (c) Bin-picking. Hentet fra [www.photonics.com](http://www.photonics.com)

Figur 5.11: Ulike potensielle visionsystemer

Kameraet er i seg selv bare en sensor som utfører datafangst. Uten software og bruk av smarte algoritmer kan ikke dataene benyttes til å genere koblingshusenes lokasjon. Zividkameraet er generisk og kan arbeide mot ulike programmer som C++, C#, og Python. Kameraet kan eksempelvis arbeide med software skrevet i Python som benytter seg av CAD-data som input, og lokasjonsalgoritmer fra programmet «Halcon» laget av det tyske selskapet MVTec Software. En slik løsning er fleksibel, kan raskt omprogrammeres, og



kan fungere i samspill med ulike kameraer og robotsystemer. Å programmere og styre systemet krever derimot større innsikt og kunnskap enn å benytte en standardløsning levert av eksempelvis av produsenter som Sick, Fanuc (iRVision), Cognex, Robotiq, og Pick-it 3D. Slike systemer kommer ofte med et brukervennlig visuelt brukergrensesnitt, men fleksibiliteten og designmulighetene er begrenset.

### **5.5.3 Materialflyt**

Konseptet som illustreres i figur 5.7 presenterer materialflyten på en generell måte. Blant annet er det store transportbåndet for transport av koblingshus ingen optimal løsning. Ved griping av komponenter med tilfeldig lokalisering vil det nesten alltid være enkelte tilfeller der objektet ikke kan gripes. Det kan forårsakes av ugunstig orientering eller at to koblingshus ligger så tett at griperfingrene ikke har plass. Det enkle transportbåndet i illustrasjonen tar ikke hensyn til dette, men problemet kan løses enkelt med en lukket transportsløyfe som tilbaketransporterer komponenter som ikke ble plukket slik at roboten får et nytt forsøk (se figur 5.11a). Et slikt system kan dessuten være mer kompakt enn det store transportbåndet brukt i illustrasjonen. Eksempler på kommersielle matesystemer laget for griping med hjelp av vision vises i figur 5.12. En mer avansert og fleksibel løsning som kan redusere arealbruk og mulig også kostnaden av matesystemene ytterligere, er å benytte seg av «bin-picking». Det vil si at en robot griper tilfeldig plasserte komponenter direkte ut av en bulkbeholder, som vist i figur 5.11c. På denne måten kan en unngå systemer som skal fordele og frakte komponenter foran et kamera. Erfaringer viser dessverre at software og visionsystemer benyttet til bin-picking ikke enda er moden for å benyttes i en industriell skala, og spesielt for små komponenter som KA sine koblingshus.

Mange matesystemer er ofte svært spesialiserte, og fungerer bare for spesifikke komponenter. Typiske produkter er bollematere og andre «shakere» med spesielle fiksturer som sørger for eksakt orientering av komponentene. Slike mekaniske innretninger er lite fleksible og vil ikke egne seg for koblingshusenes varierende geometri. Det eneste fellestrekket er at husene er sylindriske, og mange er dessuten uproporsjonale i lengderetningen. Dette kan utnyttes ved å la koblingshusene transporteres over en strekke med stigning slik at uproporsjonaliteten fører til at koblingshusene roterer og posisjonerer seg i samme retning. Dette kan hjelpe vision-systemet med lokalisering og dessuten gjøre det enklere å designe gode gripere.

### **Systemintegring**

Ved siden av å optimere montasjecellens egen materialflyt er det dessuten viktig å vurdere hvordan cellen kan kobles mot produksjonens resterende systemer, og hvordan dette kan optimeres. Etter samtaler med personer i montasjeavdelingen hos KA kom det frem at den totale materialflyten er en utfordring, og operatører bruker mye tid på å mate inn



(a) G-Flex 1500 fra Graco. Bildet er hentet fra [http://www.graco.com/content/dam/graco/ced/images/application/22978\\_crop.tif.imagep.jpg](http://www.graco.com/content/dam/graco/ced/images/application/22978_crop.tif.imagep.jpg)



(b) Mater fra Detab Ecomat. Bildet er hentet fra <http://www.detabecomat.se/img/produkter/dg-robot-feeder.jpg>

Figur 5.12: Eksempler på kommersielle matesystemer som sirkulerer komponentene som skal gripes. Merk den hvite sonen i figur 5.12b som er laget for å forenkle lokasjonsprosessen

komponenter og pakke ferdigvarer. Sistnevnte er i utgangspunktet en rutinemessig oppgave som kunne ha blitt automatisert uten vanskeligheter, men montasjecellene må være designet for å kunne integreres i et felles system. Individuelle pakkesystem for hver enkelt stasjon vil ta for stor plass og bli for kostbart.

Innmating av komponenter til de tre ulike spesialmaskinene kan utføres av operatører som fyller opp maskinenes beholdere slik det også gjøres i dagens produksjon. Et eksempel fra KA vises i figur 5.13 hvor et langt transportbånd fungerer som buffer. Operatører kan også plassere ut emballasje og koblingshus på transportbåndene, men en slik løsning er ikke optimalt ettersom det medfører mye manuelt arbeid. Det fører dessuten til at transportbåndene må være lange for å ha en nødvendig buffer. En slik arealintensiv løsning er ikke å foretrekke. Et bedre design basert på manuell påfylling er å utstyre cellen med store beholdere som automatisk kan mate komponenter til bollematere og transportbånd. På denne måten må operatører sjeldent etterfylle beholderene med nye komponenter. I nåværende konsept har de tre montasjemaskinene allerede en slik beholder for beskyttelseshetter. Beholderen vises best i figur 5.7. Å øke automatiseringsgraden ytterligere kan eksempelvis løses ved å la en robot montert på en traversbane ta hånd om innmating, eller med et AGV-system. En spesiell utfordring for den fleksible montasjecellen er det kommer til å produseres mindre batcher slik at mange ulike varianter av koblingshus må mates inn i løpet av hver dag. Det setter krav til logistikksystemet som ved omstilling må sikre at cellen er tom for utgående koblingshus i tillegg til å ta hånd om de overflødige komponentene. Felles transportløsninger er diskutert i større detalj i kapittel 5.3.



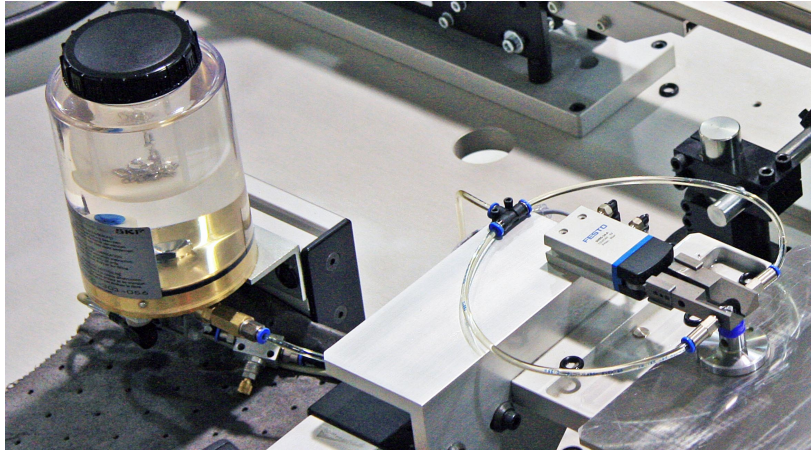
Figur 5.13: Manuell påfylling av komponenter med en relativt stor og arealkrevende buffer. Bildet er fra dagens produksjon

#### 5.5.4 Montasjeprosessen

Som beskrevet i kapittel 5.5.1 må montasjecellen takle et stort antall ulike koblingshus. De ulike komponentene som skal monteres på huset er derimot standardiserte. For best mulig å kunne oppfylle kravene til kvalitet, robusthet og fleksibilitet (se kapittel 5.2) er det valgt å lage systemet som håndterer koblingshuset fleksibelt. Selve montasjeprosessen er imidlertid spesialprodusert, og lite fleksibelt. Det er fordi økt fleksibilitet ofte gjør det vanskeligere å prestere med tanke på kvalitet og robusthet. På bakgrunn av dette er det valgt å benytte maskiner fra Ohrmann som er spesiallaget for hver enkelt portstørrelse. KA har svært gode erfaringer med Ohrmann sine produkter for håndtering av o-ringer, og de har allerede produsert tre halvautomatiske maskiner som i dag brukes i manuellmontasjen for montasje av swiveler. Maskinene er laget for de tre ulike portstørrelsene small, regular og heavy duty. Montasjeprosessen er presentert i detalj i kapittel 4.2. Maskinen benytter seg av godt utprøvde løsninger og kan raskt settes i produksjon.

Påføring av silikon utføres i manuellmontasjen ved å «dyppe» swivelen i en svamp som inneholder silikon. I den automatiserte montasjen finnes det flere ulike systemer, men i prinsippet fungerer de på den måten at dyser sprøyter nødvendig silikon på koblingens o-ringer. En løsning som benyttes hos KA i dag vises i figur 5.14. Bruk av dyser i et system som dessuten gjenbraker overflødig silikon og kontrollerer påføringen fremstår som en god løsning.

Beskyttelseshettene er formmessig svært gunstige å montere automatisert. Hettene har en konisk form som tillater en viss feilmargin ved montasje, og de kan dessuten bare monteres når hovedtetningen er tilstede. Ved montasje må dessuten koblingen presses mot beskyttelseshetten med en bestemt kraft for å «klikke» hetten på plass. Nødvendig



Figur 5.14: System for påføring av silikon i KA sin automatiserte montasje

kraft er i størrelsesorden 20–30 N og vil mest sannsynlig ikke begrense valg av industriroboter med tanke på kraftbehov. Montasjesystemet i figur 5.10 viser en enkel lineærføring som presenterer beskyttelseshettene for montasje. Føringen kan videreutvikles til å inneholde flere sensorer som sikrer kontroll av prosessen i tillegg til en bedre fiksture som beskyttelseshetten blir stående i under selve montasjesteget. Fiksturen må sørge for at hetten ikke kan skli eller vri seg dersom roboten er noe ute av posisjon. Dette er viktig med tanke på robusthet og kvalitetssikring.

Maskinen for montasje av o-ringer (se spesielt figur 5.10) som er brukt i illustrasjonene er i utgangspunktet produsert for å opereres av mennesker i en manuell montasjesituasjon, og ikke en robot; det er derfor rom for forbedring av maskinen. Ohrmann sitt prinsipp for påføring av ytre o-ringer (se kapittel 4.2) kan videreføres, men trenger ikke å «pakkes inn» i et menneskevennlig design. Systemet kan mest sannsynlig gjøres mer kompakt for å spare areal, og et kompakt system gjør det mulig å forbedre maskinens lokasjon slik at samarbeidet med roboten er mer effektiv. Systemet kan dessuten designes med elementer som hjelper å sikre koblingens posisjon i det øyeblikket swivelen presses inn i maskinen. En maskin med større robusthet fører til at større feilmargin innen lokasjon og griping kan tolereres. Det er noe som vil bidra til å forbedre systemets totale ytelse.

Dagens plassering av systemet for montasje av beskyttelseshetter og silikondispenser har måttet ta hensyn til maskinens klumpede design. Det er nå plassert på maskinen for å få kortest mulig avstander mellom stasjonene. Om en analyserer robotens bevegelser i et simuleringsprogram kan plasseringen av de ulike stasjonene mest sannsynlig forbedres ytterligere. En designidé er å lage en felles stasjon for påføring av silikon og visuell kvalitetskontroll som fungerer bedre sammen med montasjen av beskyttelseshettene. Konkret kan dette være at etter montasje av o-ringer kan roboten bevege seg mot avleveringssonen (kartongene) samtidig som robotens håndledd orienterer koblingen for montasje av silikon og beskyttelseshette. Roboten må uansett bevege seg til avleveringssonen, og tiden kan benyttes bedre om koblingen er innom stasjonene «på veien».

En annen idé er å integrere påføring av silikon i montasjeprosessen for o-ringer. Da reduseres montasjeprosessen med en hel stasjon. Disse layoutendringene er presentert i kapittel 5.5.8.

Montasjecellen presentert til nå har tatt utgangspunkt i Ohrmann sin teknologi. Å løsrive seg fra denne tankegangen og lage noe annerledes er mulig, en slik løsning er presentert i kapittel 5.5.9

### 5.5.5 Valg av industrirobot

Svært sentralt i montasjecellen er Fanuc sin gule 6-akse-robot «LR Mate 200iD» plassert. Fanuc beskriver selv roboten som «high-throughput multipurpose robot»; en effektiv flerbruksrobot. Fanuc skriver videre at LR mate 200iD gir best vekt-last forhold i sin klasse og at den er den beste og mest pålitelige roboten for prosessautomasjon. Selve roboten veier bare 25 kg, har et rekkevidde på 717 mm og kan maksimalt løfte 7 kg ved håndleddet (Fanuc, 2017a).

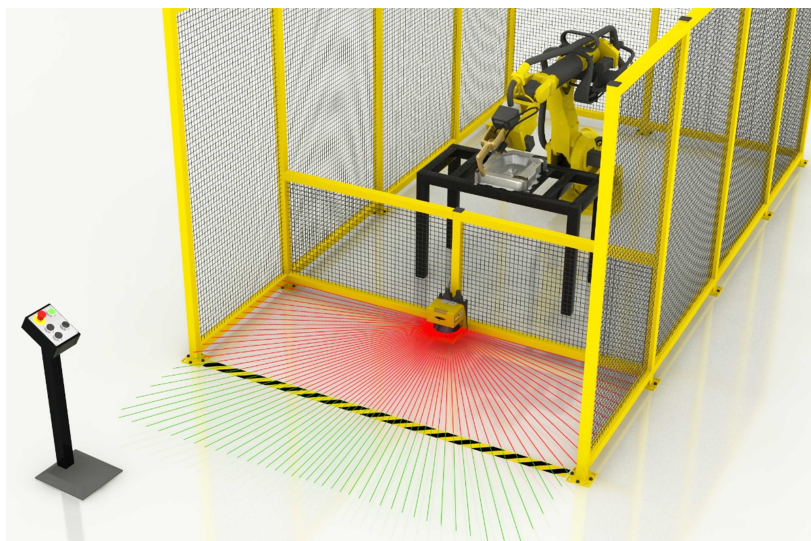
Om en undersøker tilgjengelige industriroboter i markedet er det mange ulike modeller som kan passe for montasje av swiveler. Som diskutert tidligere i kapittelet er det nødvendig med en rask og presis robot som har tilstrekkelig rekkevidde til å utføre oppgaven på en effektiv måte. Utvalget av slike industriroboter er relativt stort, men mekanisk og utifra tekniske spesifikasjon er det små ulikheter mellom de alternative produsentene. De største ulikhetene er softwareløsninger, kommunikasjonsmuligheter mot eksterne systemer og om roboten er samarbeidende slik at sikkerhetsgjerdet ikke er nødvendig. Ulike designløsninger påvirker dessuten hvordan roboten kan bevege seg, og om kabling og lignende er løst på en smart måte. I tabell 5.1 er egenskaper til aktuelle industriroboter fra ulike produsenter vurdert. Eksempelvis vil robotens egenvekt påvirke nødvendig størrelse på støttestruktur. Solid støttestruktur er viktig for å unngå vibrasjoner. Albueleddet J5 vil være spesielt aktivt i montasjecellen og maksimal hastighet for dette leddet er derfor vurdert. Dessuten er pris, rekkevidde, nyttelast og repetérbarhet åpenbare vurderingskriterier. Modellen IRB 2600 ID-8/2.0 fra ABB er noe overdimensjonert sammenliknet med de andre robotene. IRB 2600 er svært stor med hele to meter rekkevidde og en egenvekt på 273 kg. Prisen er dessuten mer enn 60% høyere enn en mindre robot fra samme produsent. Det er viktig å bemerke at en større robot øker kostnaden for selve roboten i tillegg til nødvendig støttestruktur. En mindre robot bør derfor velges med mindre det fører til at montasjecellen gir dårligere ytelse. Fremtidig kostnad av dårlig ytelse vil mest sannsynlig være en større kostnad enn den initielle ekstrakostnaden av en dyrere robot. Spesifikasjonene i tabell 5.1 er hentet fra produsentenes egne datablad, og prisene er etter mailkorrespondanse estimert av de respektive norske importørene. Prisen er vekslet 09.05.2017 med en kurs på 9,4 NOK per EUR.

Det er valgt å bruke Fanuc sin LR Mate på bakgrunn av gode tekniske spesifikasjoner. I følge tabell 5.1 er roboten raskest, mest nøyaktig og koster minst. Vekten er dessuten

Tabell 5.1: Aktuelle 6-akse industriroboter

Egenskap	Fanuc LR Mate 200iD	UR5	UR10	KUKA KR6 R900 sixx	ABB IRB 1200-5/0.9	ABB IRB 2600ID-8/2.0
Rekkevidde [mm]	717	850	1300	901	901	2000
Nyttelast [kg]	7	5	10	6	5	8
Repetérbarhet [mm]	±0,02	±0,1	±0,1	±0,03	±0,025	±0,023
Maks hastighet J5 [°/s]	545	180	180	388	405	360
Vekt robot [kg]	25	18,4	28,9	52	54	273
Samarbeidende?	nei	ja	ja	nei	nei	nei
Pris inkl. controller eks. mva [1000 NOK]	193	231	288	235	260	420

svært lav sammenlignet med de andre standard industrirobotene. Databladet for LR Mate 200iD vises forøvrig i vedlegg B.4. LR Mate 200iD er ikke samarbeidende, men Fanuc leverer den samme roboten som samarbeidende hvis det er ønskelig; prisen er naturlig nok høyere<sup>1</sup>. Med utgangspunkt i layouten vist så langt vil det ikke være hensiktsmessig med en samarbeidende layout siden operatører uansett ikke behøver å være i nærheten av roboten. Å plassere et sikkerhetsgjerde omkring cellen vil heller ikke ta mye plass; montasjemaskiner og mateutstyr er allerede plassert rundt roboten slik at det gir en naturlig avstand. Flere produsenter leverer dessuten sensorsystemer som kan overvåke produksjonscellen slik at det er mulig å unngå sikkerhetsnett i ønskede soner. Roboten reduserer hastigheten om en operatør kommer inn i sonen, og stopper eventuelt opp om personen kommer for nære. Et slikt system kan med fordel kombineres med sikkerhetsnett slik at montasjecellen er tilgjengelig for operatører i de områdene det er nødvendig. Et eksempel vises i figur 5.15.



Figur 5.15: En laserskanner sørger for å opprettholde sikkerheten i områdene uten sikkerhetsnett. Bildet er fra <https://www.bannerengineering.com/us/en.html>

<sup>1</sup>Den samarbeidende roboten "Iiwa" fra Kuka med 7kg kapasitet og 800 mm rekkevidde koster hele 658 000 kroner

### 5.5.6 Kvalitetskontroll

I tråd med designprinsippene presentert i kapittel 5.2 er kvalitetssikring et svært viktig punkt. KA sitt mål er at hvert eneste ferdige produkt skal leveres uten avvik. For å nå dette målet er robuste montasjeprosesser viktig, men også gode kontrollsystemer som garanterer produktenes kvalitet.

Som diskutert i kapittel 4.7 er dagens produksjon designet etter et kontrolleringsprinsipp som sier at alle montasjesteg kontrolleres *etter* gjennomføring. Det er mulig å forbedre denne måten å kontrollere på ved å la cellen kontrollere prosessen både *etter* og *under* gjennomføring. Det er da mulig å få et mer intelligent system som kan tilpasse seg uforutsette hendelser bedre på bakgrunn av bedre og mer informasjon om selve prosessen. Et konkret eksempel er at griperene har sensorer som registrer om komponenter er grepet eller ikke. På den måten vil ikke systemet forsøke å montere en komponent som ikke er grepet. Kontinuerlig kontroll kan også gjennomføres ved å bruke kraftsensorer som er med på å verifisere koblingen utifra vekt. Kraftsensorer kan dessuten benyttes til å måle kraftutslag i montasjesteg for å se etter unormalheter. Dette er spesielt nyttig under montasjen av beskyttelseshetter som får et spesielt fall i kraftutslag når hetten «klikker» på plass. I kombinasjon med kontinuerlig prosesskontroll kan det utføres datainnsamling for å kontinuerlig forbedre prosessen over tid, og for å ha et bedre beslutningsgrunnlag ved feilsøking. Neste skritt er å implementere kunstig intelligens som selv kan korrigere for feil. Et konkret eksempel er mekanisk slitasje som fører til unøyaktigheter i en bestemt montasje prosess. En kraftmåler har over tid målt høyere kraftutslag i en bestemt retning som følge av en viss unøyaktighet i montajesituasjonen. Ved bruk av algoritmer som forstår problemet kan systemet selv korrigere for feilposisjoneringen slik at kraftutslaget går ned til normalen.

I tillegg til kontinuerlig kontroll av delprosesser må koblingene likevel kontrolleres før pakking for å garantere at alle komponenter er montert, at riktige komponenter er montert og at de er uten skade. I dag løser KA dette ved hjelp av vision-systemer. Å videreføre denne kunnskapen til den fleksible montasjecellen fremstår som en god løsning; systemet er allerede utprøvd og testet. Dessuten har KA god erfaring med denne løsningen. I illustrasjonene i kapittel 5.5 er kontrollsystemene ikke visualisert. De er utelatt siden det finnes mange ulike plasseringsmuligheter som igjen avhenger av resten av systemdesignet. Det kan eksempelvis bygges en kombinert stasjon for påføring av silikon og kvalitetskontroll. Et kamera kan også monteres på roboten, eller det kan plasseres i kombinasjon med montasje av beskyttelseshetter. Det er mange potensielle løsninger, men som nevnt, er KA allerede gode på automatisert kvalitetskontroll. Mulige tekniske løsninger diskuteres derfor ikke i større detalj.

### 5.5.7 Software

Software er en svært essensiell del av montasjecellen, men som likevel enkelt undervurderes ettersom det i seg selv ikke er «synlig». Likevel er det åpenbart at systemet som skal styre prosessen er svært viktig. En programmeringsoppgave kan løses på mange måter, og en slik frihet kan både være positivt og negativt. Et konkret eksempel er den automatiserte manifoldmontasjen hos KA som ble installert av Tronrud. I den initiale kravspesifikasjonen var kravet fem ulike manifolder. Cellen ble derfor designet utelukkende for fem ulike manifolder. Skal en utvide dette sortimentet i dag vil kostnaden være høy; hovedsakelig som følge av programmeringsjobben som må gjøres. Om softwaren i utgangspunktet var laget for å kunne benyttes på nye fremtidige produkter ville det ikke medført den samme kostnaden å programmere montasjecellen for nye produkter. For den fleksible cellen må det være problemfritt å inkludere nye produkter i produksjonen.

I typiske automatiseringsoppgaver er det ofte slik at roboter bare programmeres én gang for den spesifikke oppgaven de skal utføre, og deretter repeteres sekvensen resten av cellens levetid. Et godt eksempel på dette er automatiserte produksjonslinjer for sveising av bilkarosseri. Robotprogrammene bygges eksempelvis opp ved at en operatør styrer roboten igjennom prosessen og lagrer hvert bestemte punkt. Skal et nytt produkt introduseres, så må programmeringen gjøres på nytt. Slik kan det også gjøres på montasjecellen for swiveler, men det er ikke en smart måte å gjøre det på. Systemet skal takle et høyt antall ulike komponenter og må være fleksibelt. Programmet bør derfor bygges opp av moduler som enkelt tilpasser seg nye produkter bare ved å få ny input for eksempel fra tilgjengelig CAD-data. Som beskrevet i kapittel 2 tilfører modularitet systemet fleksibilitet, og forbedrer systemforståelsen. Denne tankegangen er forenelig med prinsippet i Holonic Manufacturing som går ut på distribuere kontrollsystemet. De store fordelene av dette er økt fleksibilitet, robusthet og rekonfigurabilitet.

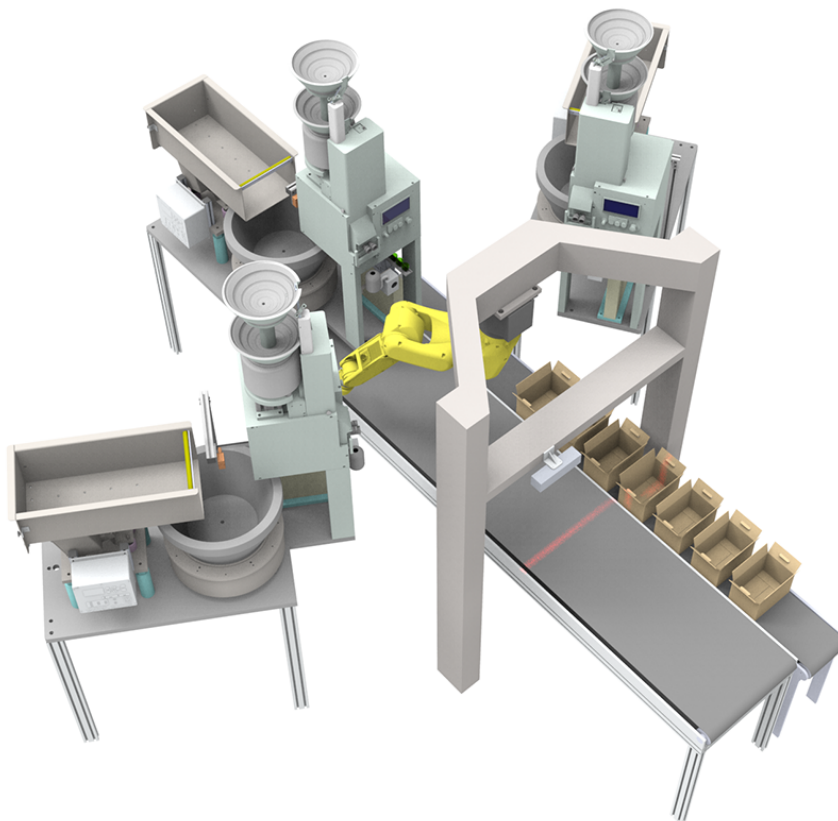
Et konkret eksempel på hvordan montasje av ulike koblingshus kan løses er å benytte det samme programmet for å utføre de ulike montasjestegene, men med individuelle justeringer hentet for hvert enkelt produkt. Programmet kan enten hente disse justeringene direkte fra en CAD-modell, eller fra en fil som fylles ut ved introduksjon av produktet. Modulen som sørger for griping av lokaliserte koblingshus kan gripe med bakgrunn i CAD-modellens koordinatsystem. Ved å justere koordinatsystemene på CAD-modellen når produktet introduseres for cellen slik at koordinatsystemet bestemmer griperflaten kan det samme programmet benyttes for lokalisering og griping av alle koblingshus. I tillegg kan det benyttes datainnsamling for å måle krefter under montasjestegene. Ved oppstart av et nytt produkt kan montasjeprosessen kjøres med lav hastighet for å måle kraftutslag under montasjen. Oppdages unormale krefter kan dette justeres for, og hastigheten justeres deretter opp. Ved omstilling kan tidligere justeringer lastes inn og benyttes på nytt.



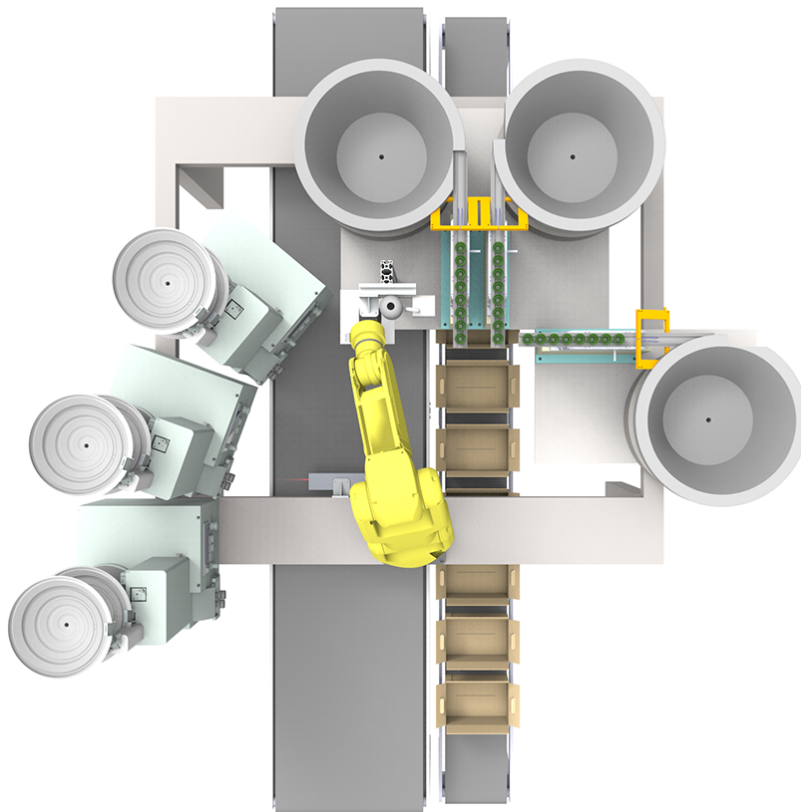
### 5.5.8 Alternative layout

Tidligere i kapittel 5.5 har mulige forbedringer blitt diskutert, og enkelte ideer presenteres nå med to ulike illustrasjoner.

I figur 5.16 er det forsøkt å plassere maskinen for montasje av o-ringer, silikon og beskyttelseshetter i kortere avstand fra roboten. Med tanke på arbeidsbevegelse er det en forbedring spesielt for maskinen som monterer small portstørrelser om en sammenlikner med løsningen i figur 5.8. I figur 5.17 er det i samsvar med diskusjonen i kapittel 5.5.4 forsøkt å gjøre montasjebevegelsene mer flytende for å redusere montasjetiden. Montasje av silikon og beskyttelseshetter er flyttet til området der koblingen avleveres. Montasjen foregår nå i en glidende bevegelse i motsetning til at alt gjøres ved Ohrmann-maskinen. Figuren viser roboten i en posisjon der kvalitetskontroll med et vision-system utføres. Montasjecellen er dessuten mer kompakt enn de andre løsningene.



Figur 5.16: Alternativ layout 1 – figuren viser en modifisering av cellen i figur 5.7. Roboten henger nå fra taket for å for å utnytte plassen bedre



Figur 5.17: Alternativ layout 2 – en modifisering av cellen i figur 5.7. Cellen er mer kompakt og har modifisert den opprinnelige arbeidsflyten ved å flytte montasje av silikon og beskyttelseshetter til området der koblingen avleveres

### 5.5.9 Et alternativt montasjesystem

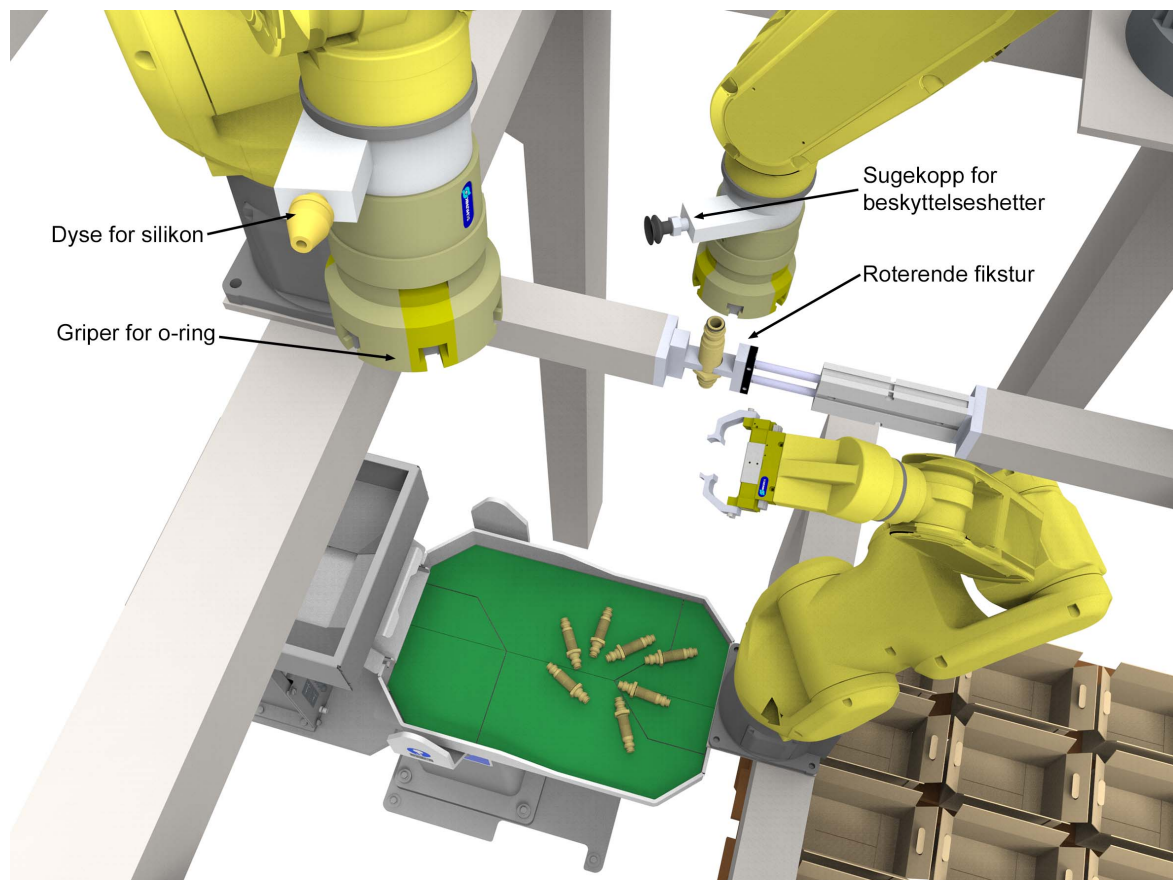
Designforslagene presentert til nå har tatt utgangspunkt i å benytte seg av Ohrmann sine systemer for montasje av o-ringer. I figur 5.19 og 5.18 er det derimot foreslått en montasjecelle som baserer seg på å benytte roboter også for montasjen av o-ringer, silikon og beskyttelseshetter. Det brukes ingen spesialmaskiner for å utføre montasjestegene. Dette strider mot prinsippet om å strebe mot maksimal robusthet og kvalitetssikring av montasjen, men cellen med 3 roboter forventes å kunne oppnå en mye lavere syklustid som følge av oppbygningen. I så henseende er dette designet spennende.

I figur 5.19 og 5.18 vises henholdsvis et oversiktsbilde og et nærbilde av en montasjecelle for swiveler. I likhet med tidligere design er det en robot (R1) som lokaliserer og plukker koblingshuset. Huset blir deretter ført inn i en fikstur som griper rundt koblingshuset slik at det holdes på plass. Fiksturen kan ha en spesialtilpasset form som hjelper å sørge for nøyaktig plassering, men dette kan påvirke omstillingstid og cellens kostnad negativt. Rundt fiksturen arbeider to roboter med montasje av o-ringer, silikon og beskyttelseshetter. Robot nr. 2 (R2) står først klar med én av o-ringene, monterer denne og beveger seg deretter for å plukke en beskyttelseshette fra en bollemater. I mellomtiden monterer robot nr. 3 (R3) den siste o-ringene og påfører silikon med en dyse. R2 beveger seg tilbake og fester beskyttelseshetten. Om koblingen har doble swiveler roterer fiks-

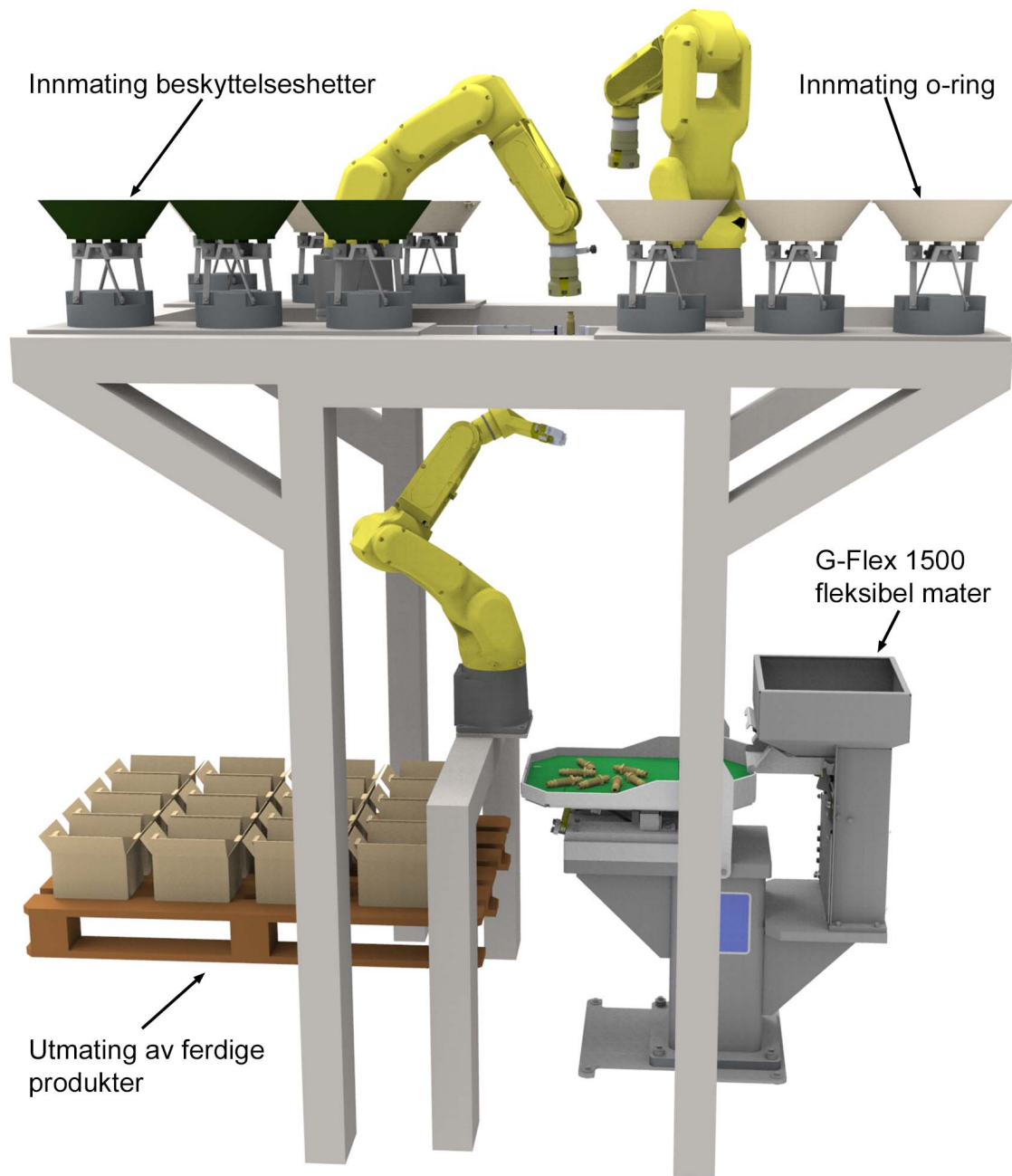
turen slik at port nr. 2 kan monteres. Til slutt griper R1 den ferdige koblingen og plasserer et nytt koblingshus i fiksturen. Griperen til R1 kan lages dobbel slik at det er plass til én ferdigmontert kobling i tillegg til et koblingshus (en slik dobbel griper er ikke illustrert i figurene).

I illustrasjonene er innmating av o-ringer og beskyttelseshetter gjort med bollematere. Dette er en svært pålitelig og effektiv løsning, men relativt dyr, spesialisert og lite fleksibel. Innmating kunne istedet blitt løst ved hjelp av færre fleksible matere, men det ville krevd et mer komplekst styringssystem og en ekstra kvalitetsjekk ved omstillinger. Å benytte fleksible matere ville mest sannsynlig redusert montasjecellens innkjøpskostnad.

Montasjecellen kunne ha vært designet med bare to roboter i motsetning til tre, men det er benyttet tre roboter for å redusere både syklustid og antall verktøybytter. I figur 5.19 er R1 plassert under R2 og R3 som monterer. Dette er for å benytte fabrikkarealet på en best mulig måte. Som følge av at R1 bare supplerer montasjefiksturen med koblingshus vil den mest sannsynlig også ha tid til å plassere ferdige produkter i kartonger; utmating er derfor visualisert med en enkel pall. Det er en svært arealeffektiv løsning sammenliknet med transportbåndet vist i figur 5.8. Skal systemet derimot kobles mot et felles transportsystem som også pakker ferdige kartonger vil en løsning med paller være lite aktuelt.



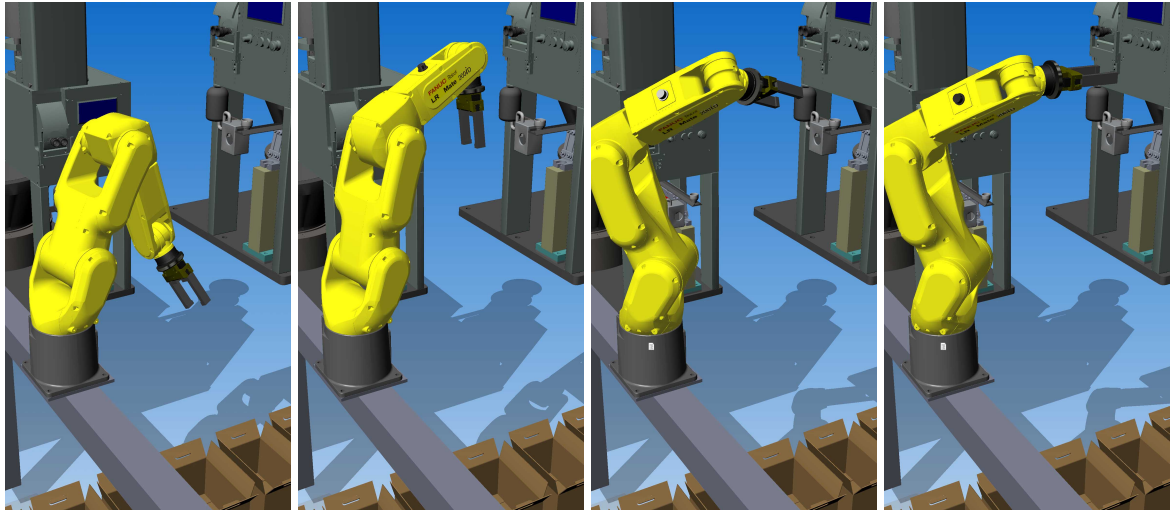
Figur 5.18: Nærbilde av en alternativ montasjecelle for swiveler



Figur 5.19: En alternativ montasjecelle for swiveler. Fabrikens gulvareal utnyttes i høyden

### 5.5.10 Simulering i Visual Components

Som nevnt tidligere i kapittel 5.5 er montasjecellens layout, og robotens plassering i forhold til de ulike maskinene svært viktig for arbeidsflyten. Parallelt med designutviklingen har det derfor blitt benyttet simuleringsprogrammet Visual Components for å simulere robotens bevegelser med ulike layout. En simulering er vedlagt som digitale vedlegg, se vedlegg C. I tillegg vises utvalgte skjermdump fra simuleringsprogrammet i figur 5.20. Bildene er tatt under arbeidet med plassering av spesialmaskinene.



Figur 5.20: Skjermdump fra simulering i Visual Components der ulike plasseringer av spesialmaskinene blir testet ut

Basert på simuleringene kan en anta at det er mulig å oppnå en syklustid mellom 10 og 15 sekunder per monterte swivel for den foreslåtte montasjecellen i figur 5.7. Med 15 sekunders syklustid vil det tilsvare 3,75 sekunder per montasjesteg. 10 sekunder tilsvarer 2,5 sekunder per monterte komponent. Dagens høyvolumproduksjon opererer med 2,5 sekunder per montasjesteg, og den fleksible cellen vil i så henseende prestere akseptabelt.

### 5.5.11 Økonomisk vurdering

Det er gjort en kostnadsberegning av den alternative montasjecellen for swiveler som er illustrert i figur 5.7. I forhold til det initielle designet er det enkle transportbåndet byttet med en fleksibel mater fra Graco. Laserscanneren er også erstattet med 3D-sensoren Zivid. Andre forhold som ikke er visualisert i figuren, men som er inkludert i kostnadsoverslaget er blant annet et verktøybyttesystem, system for kvalitetskontroll og sikkerhetsgjerder.

#### Investeringskostnader

Den foreslåtte montasjecellen er fortsatt i en konseptfase, og har ikke blitt prosjektert i detalj. Et anslag av investeringskostnader vil derfor ha en viss usikkerhet. Spesielt med tanke på prosjektering, programmeringsarbeid og oppføring. En metode å anslå kostnaden på er å studere priser for likende maskiner og utstyr som KA tidligere har kjøpt. I arbeidet med denne beregningen er det i hovedsak benyttet tall fra KA, men også noe fra Fanuc sin nordiske leverandør. Et sammendrag av kostnadene vises i tabell 5.2 mens en mer detaljert oversikt vises i tabell 5.3. Prisene er oppgitt eks. mva.

Tabell 5.2: Sammendrag av kostnadsberegning for foreslått montasjecelle

Utstyr	Kostnad [NOK]
Robotverktøy	123 000
Robotsystem	206 000
Matesystem	255 000
Spesialmaskiner	1 550 000
Kvalitetskontroll	40 000
Annet	330 000
<b>Totale investeringer</b>	<b>2 504 000</b>

I tabell 5.3 vises en mer detaljert oversikt over de ulike kostnadspostene. Det antas å være behov for tre ulike robotverktøy. Griperen laget i kapittel 6, et verktøy for union-koblinger og et siste verktøy for å montere pluggen. Prisene benyttet er for Schunk KGG 80-30 pneumatiske gripere med nærhetssensorer. Verktøybyttesystemet er Schunk SWA og SWK, og kraftsensoren er levert av Fanuc. Fanuc leverer dessuten roboten LR Mate 200iD med tilhørende kontrollsystem og software. Prisen er hentet fra den nordiske importøren. Prisen for matesystemene, spesialmaskiner, kvalitetskontroll og de diverse kostnadene under «annet» er estimert på bakgrunn av liknende innkjøp hos KA. Tallene med størst unøyaktighet er matesystemet for koblingshus, software, elektriske installasjoner og dessuten prosjektering-, programmering- og installasjonskostnader.

Tabell 5.3: Estimerte kostnader for en swivel-montasjecele

	<b>Komponenter</b>	<b>Antall</b>	<b>Totalkostnad</b>
<b>Robotverktøy</b>	Gripere fra Schunk	3	12 000
	Quick-change adapter til robot fra Schunk	1	4000
	Quick-change adaptere til verktøy fra Schunk	3	9000
	Stativ gripere	1	2000
	Spesialtilpassede griperfingre	3	6000
	Kraftsensor	1	90 000
			<b>123 000</b>
<b>Robotsystem</b>	Fanuc LR Mate 200iD inkludert controller	1	196 000
	Sokkel til robot	1	10 000
			<b>206 000</b>
<b>Matesystem</b>	Graco G-flex matesystem for koblingshus	1	160 000
	Transportbånd for ferdige produkter	1	35 000
	3D-kamera fra Zividlabs til lokalisering	1	100 000
	Software fra Halcon til lokalisering	1	20 000
			<b>315 000</b>
<b>Spesialmaskiner</b>	Maskin fra Ohrmann for o-ring-montasje	3	990 000
	Maskin for montasje av beskyttelseshetter	3	525 000
	Maskin for påføring av silikon	1	35 000
			<b>1 550 000</b>
<b>Kvalitetskontroll</b>	Kamera fra Cognex til kvalitetskontroll	1	20 000
	Software og PC	1	20 000
			<b>40 000</b>
<b>Annet</b>	Elektriske og pneumatiske installasjoner	-	40 000
	Sikkerhetsgjerder	-	40 000
	Programmering og installasjon	-	150 000
	Prosjektering	-	100 000
			<b>330 000</b>

## Montasjekostnader

Med utgangspunkt i den økonomiske modellen presentert i kapittel 2.2.4 gjøres en enkel beregning av montasjecellens montasjekostnad per enhet. Merk at modellen som benyttes tar forbehold om null restverdi, flat avskrivning uten rentekostnader og dessuten manuell etterfylling av komponenter. Montasjekostnad per enhet er følgende:

$$K_e = \frac{N_s \times I}{T_t \times V_p} + \frac{L \times B}{P_a}$$

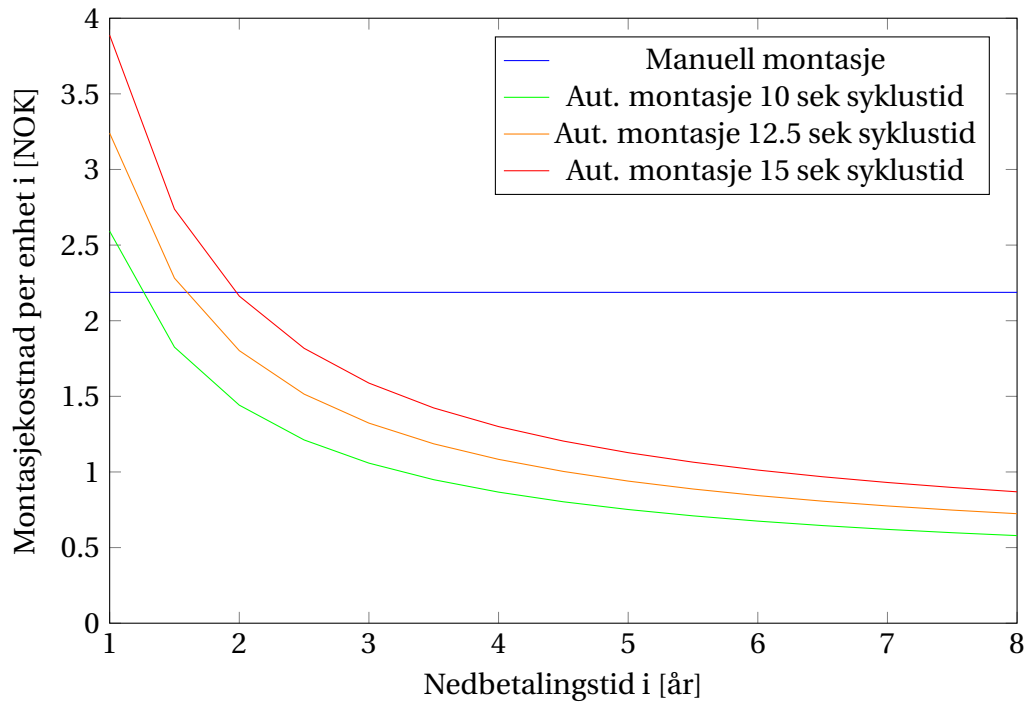
De ulike tallene benyttet i utregningen forklares i tabell 5.4. Det årlige produksjonsvolumet er beregnet med utgangspunkt i KA sin treskiftsordning med totalt 3780 timer i året, en oppetid på 80% og en syklustid på 12,5 sek. per kobling. Syklustiden er valgt på grunnlag av simuleringer i Visual Components ved produksjon av koblinger med én swivel. Lønnskostnadene er de samme KA benytter i dagens budsjett. Andel operatørtid er typisk 0,6 eller 0,7 for KA sine høyvolumautomater, men det er antatt at et lavere tall er mer riktig for den fleksible montasjecellen ettersom produksjonsvolumet er lavere, og mindre tid er nødvendig for ferdigvarepakking og lignende.

Tabell 5.4: Tall benyttet for beregning av automatiserte montasjekostnader

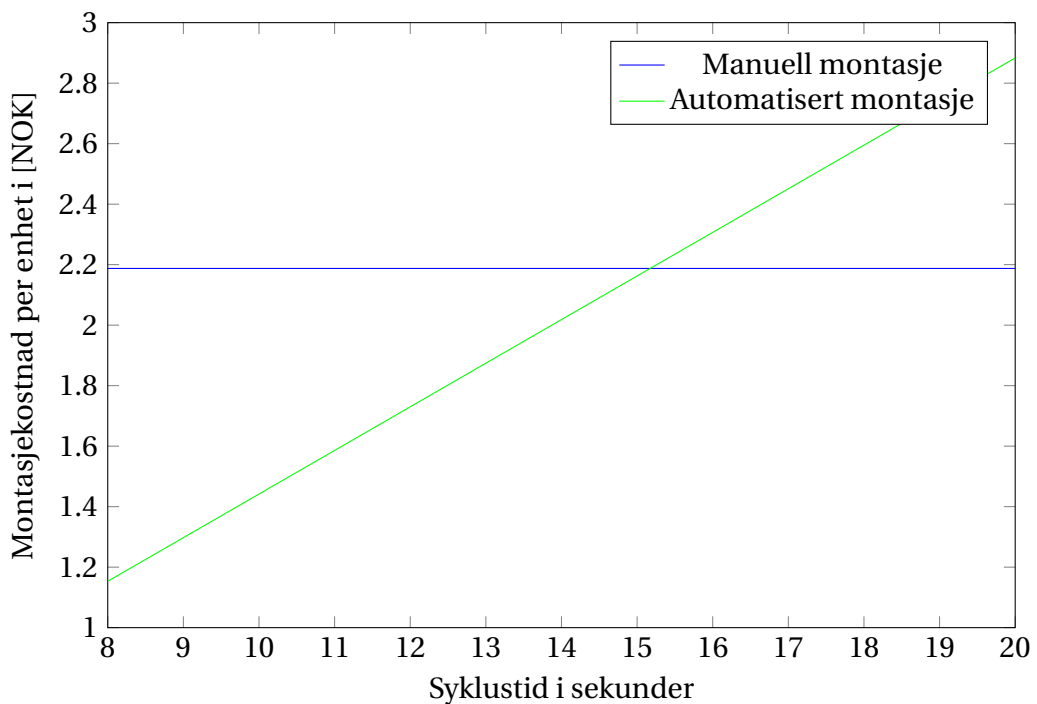
Variabel	Verdi	Kommentar
$N_s$	1 stk.	Antall montasjeceller
$I$	2 504 000 NOK	Investeringskostnad
$T_t$	2 år	Nedbetalingstid
$V_p$	870 912 stk./år	Årlig produksjonsvolum ved 80% oppetid
$L$	350 NOK/time	Lønnskostnader
$B$	0,3	Andel operatørtid
$P_a$	288 stk./time	Produksjonsvolum per time

Med de presenterte tallene blir montasjekostnad per enhet 1,80 NOK. For den manuelle montasjen beregner KA i dag montasje av 160 produkter i timen for enkle koblinger med én swivel. Med en lønnskostnad på 350 NOK per time blir den manuelle montasjekostnaden per enhet 2,19 NOK. I figur 5.21 er tre utvalgte syklustider plottet både mot ulike nedbetalingstider, og manuell montasje. Figur 5.22 illustrerer enhetskostnaden av manuell og automatisert montasje for ulike syklustider.





Figur 5.21: Montasjekostnad per enhet ved ulike nedbetalingsperioder og ulike produksjonsvolum. Resterende verdier fra tabell 5.4



Figur 5.22: Montasjekostnad per enhet ved ulike syklustider og 2 års nedbetalingstid. Resterende verdier er i henhold med tabell 5.4

## 5.6 Oppsummering av designutviklingen

Oppgavens store utfordring er å kombinere følgende krav:

- Hyppig omstilling ettersom lavvolumsprodukter skal monteres
- Montasje av svært mange ulike komponenter der flertallet er geometrisk små og har lave toleranser som setter høye krav til montasjeprosessens nøyaktighet
- Høye kvalitetskrav til de monterte produktene, og krav om null-feil
- Produksjonen må være robust og effektiv
- Mer enn 170 ulike produkter og et potensielt høyt samlet volum skal monteres

Med bakgrunn i tilgjengelig informasjon mener jeg den beste løsningen for å kunne kombinere kravene om fleksibilitet med robusthet, kvalitet og effektivitet er å lage flere *proessorienterte* fleksible montasjeceller. Ved å gjøre dette kan kritiske prosesser som krever spesielt høy nøyaktighet utføres av spesialiserte maskiner mens et fleksibelt styringssystem i kombinasjon med industriroboter, visionsystemer og kraftsensorer sørger for den nødvendige fleksibiliteten. Konseptet åpner dessuten for å utføre montasjen med relativt lav takttid.

Den kritiske oppgaven sett i lys av kravet om fleksibilitet er identifisert som *lokasjon, griping og orientering av de ulike koblingshusene*. Det er koblingshusene som kan variere på et uvisst antall måter, og de oppebevers i bulk. Det er foreslått at prosessen fra lokalisering til griping, kontrollering og orientering av koblingshusene bør standardiseres som en generisk metode. På denne måten kan metoden benyttes i alle de ulike montasjecellene på en kostnadseffektiv måte. At enkelte produkter må delmonteres er en negativ effekt av å dele montasjen etter de ulike montasjeprosessene. Samtidig vil det være mulig å redusere den negative effekten ved å benytte den standardiserte metoden for lokalisering og griping. Det er dessuten foreslått å benytte et automatisert transportsystem for å håndtere det ekstra transportbehovet, system kan dessuten gjøre det lønnsomt å realisere et automatisert pakkesystem.

Montasjecellen presentert i kapittel 5.5 er en konkret løsning for montasje av swiveler på alle mulige koblingshus. Løsningen benytter spesialmaskiner for å utføre krevende montasjesteg mens et fleksibelt system håndterer de ulike koblingshusene. Ved å benytte modulær programmering og et visionsystem basert på CAD-input kan cellen realiseres og benyttes for et hvilket som helst produkt som behøver montasje av swiveler, uten å måtte konfigureres. Ingen nye fiksturer eller jigger må lages for å innføre nye produkter. Unntaket er at utvalgte koblingshus kan behøve tilpassede griperfingre.

### 5.6.1 Videre designutvikling av montasjecellen

Flere ulike konsepter er blitt presentert, og mange viktige tekniske vurderinger har blitt diskutert. Det gjenstår et arbeid med å tallfeste løsningens ytelser sammenlignet med alternative layout. I dette arbeidet behøves dessuten mer input fra KA om hva som er den overordnede strategien, og mer nøyaktige tall om produksjonsvolum og montasjekostnader. For den foreslåtte montasjecellen til swiveler bør det gjøres en mer nøyaktig analyse av hvilke produksjonsvolum som behøves, og om en løsning med spesialmaskiner, eller flere industriroboter tilfredsstillende KA sitt behov og strategiske ønske på best mulig måte. I sammenheng med analyse av produksjonsvolum kan det dessuten vurderes å installere en ekstra industrirobot til å arbeide mot spesialmaskinene for å øke både utnyttelsesgraden og årlig produksjon. Når det kommer til ulike tekniske løsninger er det spesielt viktig å teste systemet for lokalisering, griping og orientering; men også samarbeidet mellom Ohrmann-maskinen og industriroboten som utfører montasjen. Det er viktig å tallfeste nøyaktigheten som kan oppnås, men også systemets robusthet og hvilken syklustid det er mulig å oppnå. Oppsummert bør følgende undersøkes:

1. Vurdere kostnad, brukervennlighet og robusthet av fleksible matere mot bollematere for beskyttelseshetter
2. Gjøre en mer detaljert beregning for å se om Ohrmannmaskinenes kostnadsnivå kan rettferdiggjøres. Utføre praktiske tester for å undersøke hvordan en mer fleksibel løsning med montasje ved hjelp av en industrirobot og o-ringgriper presterer
3. Verifisere systemet for lokalisering, griping og orientering i praksis
4. Teste nødvendig nøyaktighet ved bruk av industriroboter for å montere swiveler med maskiner fra Ohrmann

Andre elementer som ikke har blitt vurdert i denne oppgaven, men som kan være relevant for videre arbeid er følgende:

- Analysere i hvilken grad design for montasje (DFA) kunne ha forenklet den automatiserte montasjeprosessen, og hvilke grep som i størst grad ville fungert praktisk og økonomisk
- Se på delmontasje av o-ringer i conelementer for å benytte i både høyvolumautomatene, fleksibel-, og manuell montasje



# Kapittel 6

## Griperdesign

I forbindelse med utviklingen av montasjecellen i kapittel 5.5 ble det tydelig at den store utfordringen knyttet til en *fleksibel* montasjecelle er KA sine ulike koblingshus. Koblingshusene er lagret i bulk; så prosessen fra lagring der komponentene har en tilfeldig lokasjon til nøyaktig montasje av små komponenter er svært viktig. Å benytte seg av mekaniske løsninger for å orientere koblingshusene kan ikke gjøres i en fleksibel celle ettersom hver enkelt kobling behøver tilpasset utstyr, og mengden nødvendig spesialutstyr vil bli for stor. Løsningen er å benytte seg av et vision-system for å lokalisere koblingshusene. Deretter gripes og orienteres huset slik at montasjen kan utføres. Målet er å ha svært nøyaktig kontroll på huset i det øyeblikket montasjen foregår. Håndtering av koblingshus er ikke bare relevant for montasjecelle i kapittel 5.5, men for alle KA sine fremtidige fleksible montasjeceller. Den samme problemstillingen er dessuten sentral i manifold- og klysemontasje. Sistnevnte er noe KA ønsker å satse mer på i fremtiden.

Som nevnt tidligere oppbevares både koblingshus, byggeklosser og manifolder i bulk; men dersom komponentene skal brukes i automatisert produksjon må posisjonen kontrolleres. Griperen er en viktig del av denne oppgaven, og et godt griperdesign kan bidra til å sikre orientering av delen slik at hele prosessen blir mer robust. Er vision-systemet unøyaktig, kan dette kompenseres av et veldesignet griperverktøy slik at systemet ender opp med god nøyaktighet der montasjen foregår. Lokasjon og griping bør sees på som et felles system som sammen skal levere høy nøyaktighet og robusthet. Alternativet er å anta at vision-systemet gir perfekte input og deretter gripe med en generisk griper. Dette kan fungere godt i systemer med svært kontrollerte omgivelser og velegnede komponenter, men erfaringene med KA sine produkter viser at å oppnå nødvendig nøyaktighet, robusthet og hastighet er vanskelig.

*I dette kapitlet designes griper med fokus på økt robusthet, kvalitet og fleksibilitet. Se kapittel 3 og 4 for utdypende fakta om KA sin produksjon*

## 6.1 Designprinsipper

I likhet med designprinsippene i kapittel 5.2 skal griperen lages etter krav om kvalitet, robusthet og fleksibilitet. Det skal utvikles en griper som:

1. kan gripe flest mulig ulike koblingshus
2. låser lokasjon og orientering i alle retninger med svært liten feilmargin
3. kan gripe komponenter som er noe ute av posisjon. Det vil si at griperen er robust for feil input-koordinater fra vision-systemet
4. ikke skader koblingshuset
5. er designet med tanke på brukervennlighet

Griperen som utvikles i dette kapittelet er rettet mot å gripe koblinger som skal monteres i montasjecellen fra kapittel 5.5. Montasjecellen monterer alle koblinger med swiveler. Koblingshusene varierer fra svært små og lette kompositthus til større bulkhead-koblingshus i messing. Enkelte av koblingene har dessuten doble swiveler, det vil si én swivel i hver ende av koblingen. Eksempler på koblinger som skal gripes vises i figur 6.1 og 5.6. De kraftige messingkoblingene har store flater som gjør de forholdsvis enkle å gripe. Komposittkoblingene er derimot små, svært lette og har en ujevn og uregelmessig overflate. Den minste koblingen nede til høyre i figur 6.1 er svært kort, bare 22 mm i z-retning. Koblingen til venstre er derimot hele 101 mm lang, og veier 187 gram.



Figur 6.1: Et utvalg koblinger med swiveler

Basert på en gjennomgang av KA sine produkter kan en oppsummere med at griperen skal designes for koblingshus med en vekt fra 4 til 200 gram, og en lengde fra 20 til 150 mm. Griperflaten er koblingenes sylindriske overflater, og diameteren varierer fra

10 til 28 mm. Griperen skal være laget for å kunne føre koblingshuset med høy presisjon inn i de ulike maskinene i montasjecellen for swiveler. Under montasje vil griperen ikke utsettes for ytre krefter større enn 30 newton.

### 6.1.1 utfordringer

Visse hindringer er forbundet med kravene som settes til griperen. Et av de mest sentrale utfordringene å lage et verktøy som fungerer på størst antall ulike koblingshus; men som likevel gir god kontroll over koblingshusene slik at montasjecellen kan være robust, samt levere høy kvalitet på produktene som produseres. Den store variasjonen i koblingshusenes geometri er dessuten en ekstra utfordring. I figur 6.1 er blant annet kompositthusene svært ujevne, og messingkoblingene har store heksagonale utstikk i størrelse M16 – M34 som vil komme i veien når koblingene skal håndteres. KA sine produkter er designet med fokus på funksjon, og ikke for å gripes i en automatisert produksjon. Griperen som skal lages bør dessuten være robust og produsert i høy kvalitet slik at problemene visualisert i figur 6.2 ikke inntreffer. Dårlig griperdesign og unøyaktige griperfingre kan føre til feilposisjonering av komponenten som gripes. I figur 6.2b er eksempelvis forholdet mellom griperkraft og lengden på griperfingrene feil. Resultatet blir at kontakten mellom arbeidsstykket og griper minimeres slik at kontrollen over arbeidsstykket blir dårlig og uforutsigbar.

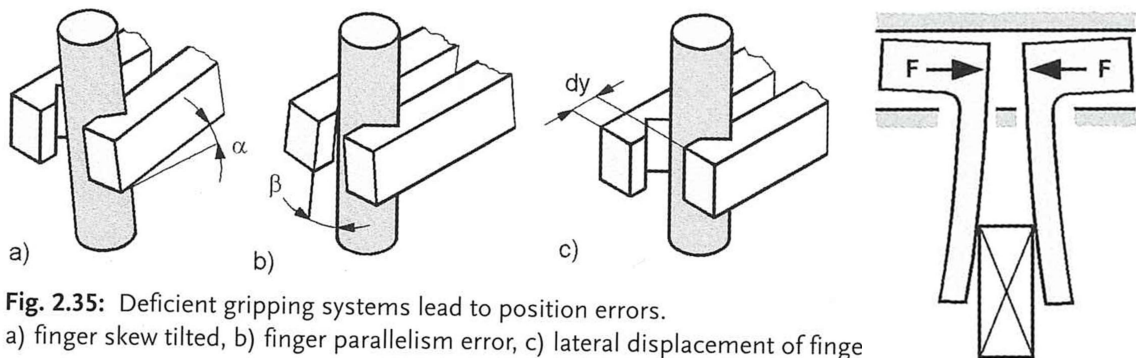


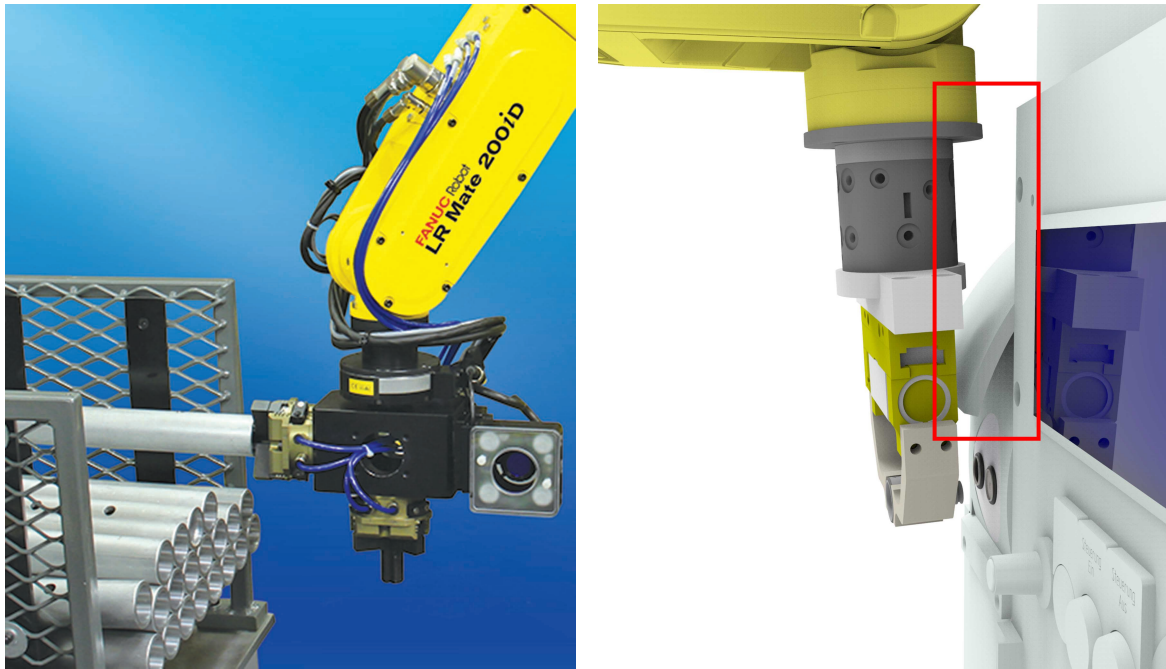
Fig. 2.35: Deficient gripping systems lead to position errors.

a) finger skew tilted, b) finger parallelism error, c) lateral displacement of finge

(a) Eksempler på hvordan feilkonstruerte gripersystemer fører til dårlig posisjonering av arbeidsstykket (b) For lange griperfingre

Figur 6.2: Eksempler på dårlig griperdesign hentet fra (Monkman et al., 2007)

Flere av koblingshusene som skal gripes er svært små, og potensielle griperflater blir følgelig begrenset. I tillegg må huset gripes på en måte som lar roboten føre swivelen inn i en maskin slik at nødvendige komponenter kan monteres, denne utfordringen illustreres i figur 6.3b. I tillegg er det ikke bare robotens griperfingre som krever plass. Som oftest består EOAT også av utstyr som kameraer, sensorer og kabler. Et godt eksempel er robotarmen i figur 6.3a. Fanuc-systemet har montert to griper, et kamera for kvalitetsskontroll og dessuten en kraftsensor.



(a) EOAT med flere funksjoner. Bildet er hentet fra <http://robot.fanucamerica.com> (b) Kollisjon mellom griper og montasjemaskin

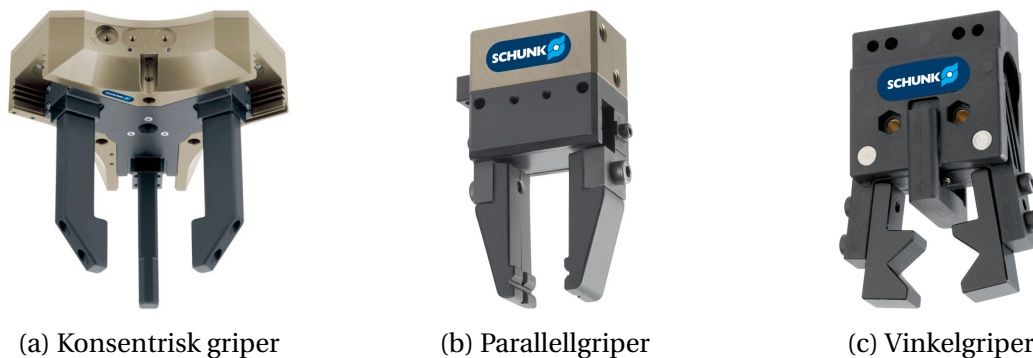
Figur 6.3: Plassutfordringer ved utforming av gripersystemet

## 6.2 Designutvikling

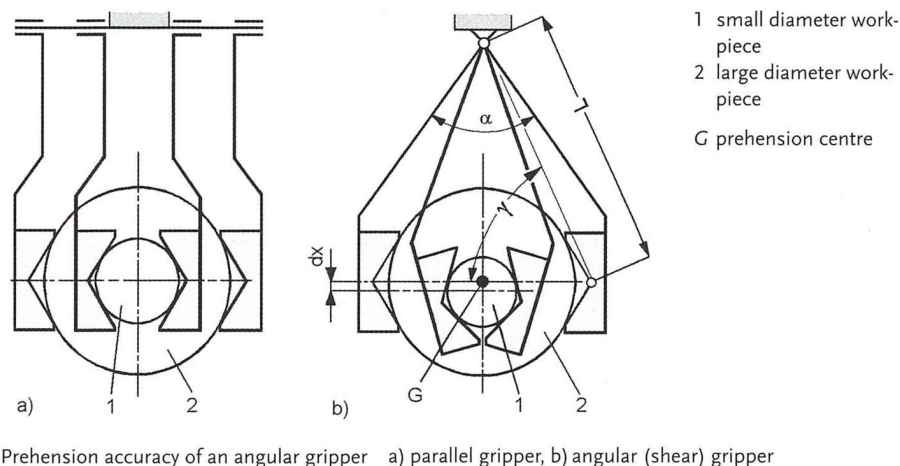
Monkman et al. (2007) definerer i boken «Robot Grippers» fire generiske hovedkategorier for alle gripende gjenstander: bindende, gjennomtrengende, berørende og støtende griping. Konkrete eksempler er hhv. bruk av magnetisme eller vakuumpåse, nåler og kroker, bruk av lim og overflatespenning, eller klemmende og klypende griper. Basert på at koblingene som skal gripes er faste, ikkemetalliske objekter anbefaler Monkman et al. (2007) å benytte en mekanisk støtende griper, eller en vakuumpåse. Tar en hensyn til koblingenes ujevne og sirkulære overflate blir vakuumpåse derimot ikke aktuelt. Av mekaniske støtende griper er det i hovedsak fire hovedgrupper: parallelle, vinkel, konsentriske og interne griper. I figur 6.4 vises tre av de ulike prinsippene, men om en designer griperfinger til intern griping kan griperene i figur 6.4 også benyttes til innvendig griping.

Av disse alternativene kan konsentriske- og vinkelgriper utelukkes. Konsentriske griper vil for denne oppgaven ikke være mulig å benytte som følge av at koblingen skal gripes liggende på en flat overflate. Vinkelgriper kan benyttes, men siden sylindriske objekter med varierende diameter skal gripes vil det føre til ulik lokasjon av koblingens koordinatsystem i forhold til griperens senter (TCP). Figur 6.5 illustrerer problemet med to ulike sylindre som skal gripes (merket som 1 og 2), og en parallel- og vinkelgriper (a) og b)). Som figuren viser, vil koblingens senter (G) variere i vertikal retning som følge av endring av vinkel  $\alpha$ . Den parallelle griperen a) i figur 6.5 vil derimot sentrere arbeidsstykket i griperens TCP for ulike sylinderdiametre. Det faktum at ulike koblinger har lik lokasjon i griperen er verdifullt for de som skal programmere og bruke systemet. Det





Figur 6.4: Tre ulike griperprinsipper og tre ulike gripere fra Schunk. Bildene er hentet fra [https://de.schunk.com/de\\_en/gripping-systems/](https://de.schunk.com/de_en/gripping-systems/)



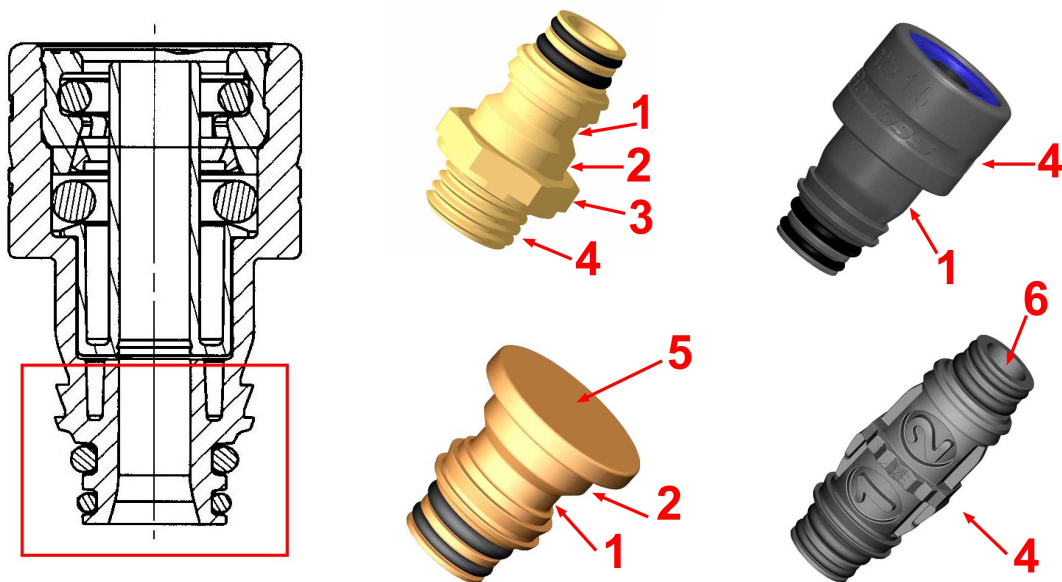
Figur 6.5: Figuren viser hvordan en vinkelgriper forskyver arbeidsstykkets senter for ulike diametre. Bildet er hentet fra (Monkman et al., 2007)

gjelder spesielt for en fleksibel celle som skal produsere et stort antall ulike produkter.

Av ulike driversystemer er det for en parallellgriper aktuelt med pneumatisk, hydraulisk eller elektrisk drift. Hydraulikk benyttes i hovedsak der det er behov for store krefter, noe som er unødvendig i vårt tilfelle. Pneumatikk er en rimelig løsning som er lett å implementere, men det gir ingen direkte måte å kontrollere griperens posisjon. Med pneumatikk kan en enten åpne maksimalt, eller lukke griperen. Elektrisk drevne griper gir derimot mulighet til å kontrollere både griperkraft og posisjon nøyaktig. Det er blant annet mulig å bare delvis lukke griperen. Enkelte av Schunk sine elektriske griper er dessuten laget med TPC/IP-tilgang som gjør det enkelt å gjøre datainnsamling. For vårt tilfelle der et stort antall ulike komponenter skal håndteres, og gripes etter input fra visionsystemer øker risikoen for uforutsette hendelser. Eksempelvis at et koblingshus gripes noe skjevt slik at griperen ikke lukkes og posisjonerer huset riktig. For å takle disse utfordringene er det nødvendig med sensorer som overvåker prosessen. Om den beste løsningen er eksterne sensorer på pneumatisk griper eller å benytte seg av elektriske griper må analyseres i større detalj (RIA and Bennet, 2001).

## Griperflater

Som beskrevet i kapittel 4.1 er det ikke tillatt å gripe koblinger der o-ringer skal monteres. I tillegg må det være tilstrekkelig plass i området rundt o-ringene slik at Ohrmann sin montasjemaskin kan benyttes. Det defineres derfor en sone omkring swivelen som ikke er tilgjengelig for griping. Sikkerhetssonen illustreres i figur 6.6a. Analyseres koblingene finner en enkelte griperflater som er tilstede på flere av de ulike koblingene. Sonene vises i figur 6.6b. Den flaten som umiddelbart peker seg ut med størst flate i tillegg til best klarering fra swivelen er sone nr. 4. I tillegg er den spesielle sonen nr. 5 svært velegnet for å gripes med en vakuumbgriper. Innvendig griping i sone nr. 6 kan være passende i visse situasjoner. Områdene 1, 2 og 3 utelukkes som mulige griperflater ettersom overflatene er uregelmessige og ikke alltid parallelle, de er i tillegg nære sikkerhetssonen.



(a) koblingens sikkerhetszone

(b) Griperflater

Figur 6.6: Koblingens geometriske begrensninger

## Utforming av griperfingre

I følge de designprinsippene i kapittel 6.1 skal griperen kunne gripe komponenter ute av posisjon, og sentrere de på en god måte. Lokasjon og orientering skal dessuten låses i flest mulige retninger slik at griperen kan tilfredstille høye krav til nøyaktighet. Samtidig må griperen kunne gripe størst antall ulike koblingshus. De nevnte faktorene avhenger av hvordan griperfingrene designes; en god illustrasjon vises i figur 6.7. Om en studerer figuren er det enkelt å se hvordan flere kontaktpunkter reduserer antall frihetsgrader. Spesielt illustrasjonene med to og fire frihetsgrader ( $F=2$  og  $F=4$ ) kan sammenlignes direkte med koblingshusene som skal gripes. For at sylindret med fire frihetsgrader skal kunne vrís rundt må ytre krefter overstige friksjonskreftene fra griperen. Det betyr at i

de tilfeller der en kan garantere at komponentene gripes perfekt, og at ytre krefter ikke endrer posisjonen, så er det ikke nødvendig med et stort fokus på å redusere antall frihetsgrader. I vårt tilfelle kan ikke riktig lokalisering av koblingen garanteres i det øyeblikket den gripes, og griperens fingre bør derfor bidra til å sikre posisjonen. Som visualisert i figur 6.8 er det ikke nødvendig med en konsentrisk flerfingret griper for å skape ytterligere kontaktpunkter. Med riktig design kan også parallellgriper med to fingre ha flere kontaktpunkter. Monkman et al. (2007) konkluderer i sin bok om at et stabilt grep er en av de viktigste egenskapene i et griperesystem. Han skriver videre at mange kontaktpunkter og store kontaktflater kan skape stabilitet og redusere kraftbehovet. Det ultimate grepet får man i følge Monkman et al. (2007) ved å ha en perfekt match mellom griper og arbeidsstykkets profil.

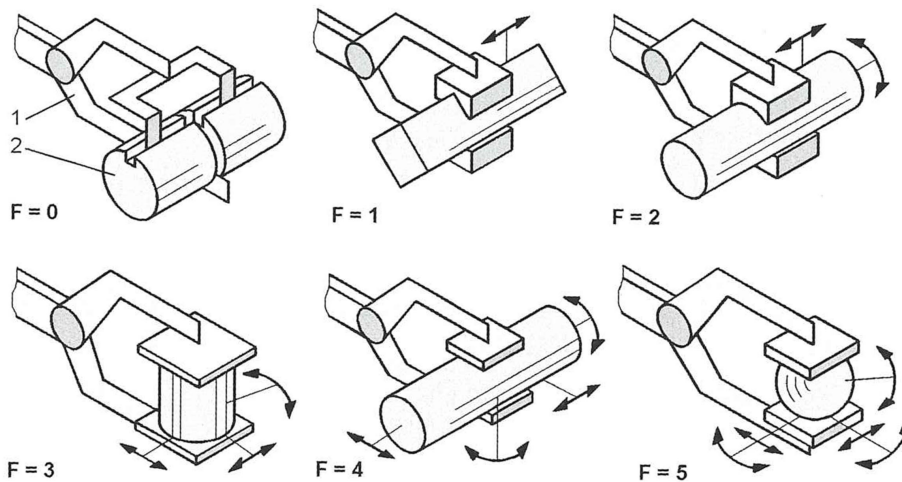


Fig. 2.6: Different active pairs with degree of freedom  $F=0$  to  $F=5$   
1 gripper jaw, 2 workpiece

Figur 6.7: Arbeidsstykkets frihetsgrader ved bruk av ulike griperfingre. Bildet er hentet fra (Monkman et al., 2007)

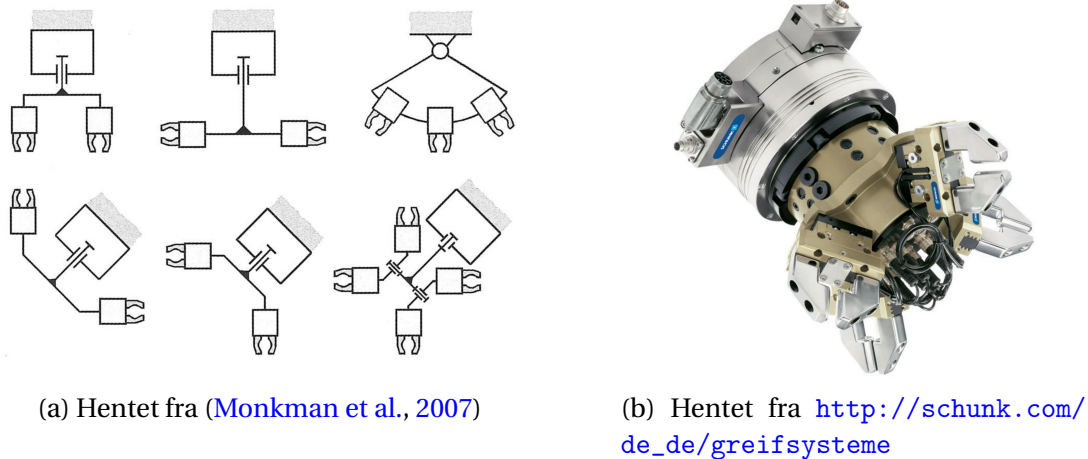
	single point contact	two point contact	multi-point contact
1 finger gripper			
2 finger gripper			
3 finger gripper			

Figur 6.8: Sammenheng mellom antall fingre, fingerdesign og kontaktpunkter. Figuren er hentet fra (Monkman et al., 2007)

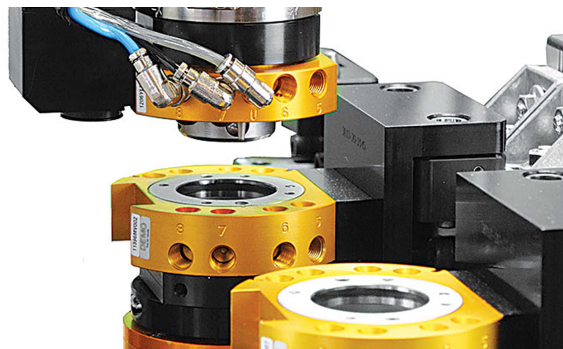
## Gripersystemet

Å lage én griper som håndterer alle KA sine ulike koblinger på en god måte vil mest sannsynlig være umulig. For å dekke behovet er en mulig løsning å manuelt bytte griperfingre ved omstilling, benytte seg av et verktøybyttesystem eller lage en EOAT med en «turret» av gripere slik figur 6.9 illustrer. En turret kan utstyres med flere identiske gripere slik at roboten kan transportere flere komponenter samtidig, og på den måten spare tid under forflytning. Turretens gripere kan også være ulike slik at gripersystemet som helhet blir mer fleksibelt, og kan takle flere ulike komponenter.

Et verktøybyttesystem øker produksjonscellens fleksibilitet, og lar roboten automatisk bytte mellom verktøy i løpet av noen få sekunder. Systemet består av en hovedadapter som er montert til roboten, og verktøyadaptere som er festet til ulike verktøy. De ulike verktøyene kan plasseres i et stativ lett tilgjengelig for roboten. Ved bruk av trykkluft kan roboten koble seg til nye verktøyadaptere, og ved hjelp av spesielle lar systemet trykkluft og sensordata overføres. Figur 6.10 viser et verktøybyttesystem levert av ATI, men liknende systemer leveres av både Schunk, Kosmek, Wemo og Stäubli.



Figur 6.9: Figuren viser hvordan EOAT kan bestå av flere gripere



Figur 6.10: Et verktøybyttesystem fra ATI. Bildet er hentet fra <http://www.assemblymag.com>

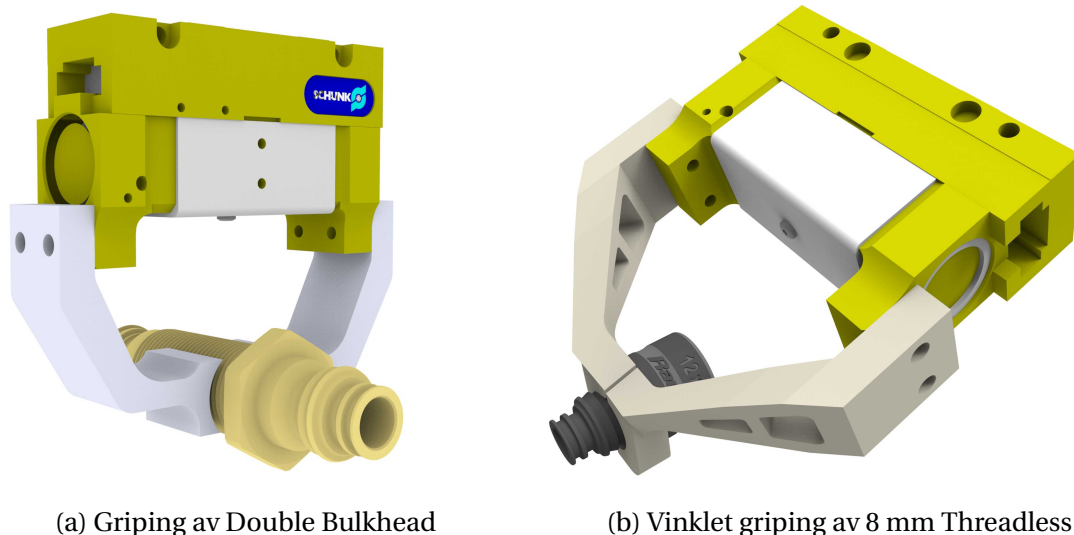
## 6.3 Griperkonsepter

Med bakgrunn i diskusjonen gjort i kapittel 6.2 presenteres enkelte griperkonsepter laget i SolidWorks. Designene har ulike fordeler og ulemper, og må sees på som en del av ide-myldringen og designutviklingen. Ved hjelp av prototyping og praktisk testing har det blitt gjort nyttige erfaringer om de ulike konseptene som har bidratt med å komme frem til den endelige løsningen; en løsning som kombinerer ideer fra de ulike konseptene.

Tankesettet bak konsept 1 er å lage enkle, små griperfingre med størst mulig griperflate. Konsept 2 tar derimot utgangspunkt i å være så robust som mulig, og konsept 3 benytter seg av muligheten for innvendig griping. De to første konseptene tar utgangspunkt i å benytte seg av en gripermodul fra Schunk laget for små komponenter, men med relativt lang slaglengde per griperfinger; KGG 80-30. Datablad for KGG 80-30 finnes i vedlegg B.4.

### Konsept 1 – spesialtilpassede fingre

Tanken bak konseptet er å benytte seg av konklusjonen i kapittel 6.2 om at best kontroll og stabilitet oppnås med griperfingre som matcher arbeidsstykket. KA introduserer sjeldent nye produkter i sin produksjon, og det å spesiallage nye griperfingre vil derfor ikke være forbundet med en stor kostnad siden griperen kan benyttes i lang tid. Griperfingrene er små, og de kan lages ved at CAD-modellen justeres etter nye parametere og eksempelvis produseres ved additiv tilvirkning. Den store utfordringen med løsningen er at nye koblinger vil øke behovet for stadig flere griperfingre. To eksempler på tilpassede griperfingre vises i figur 6.11a og 6.11b.

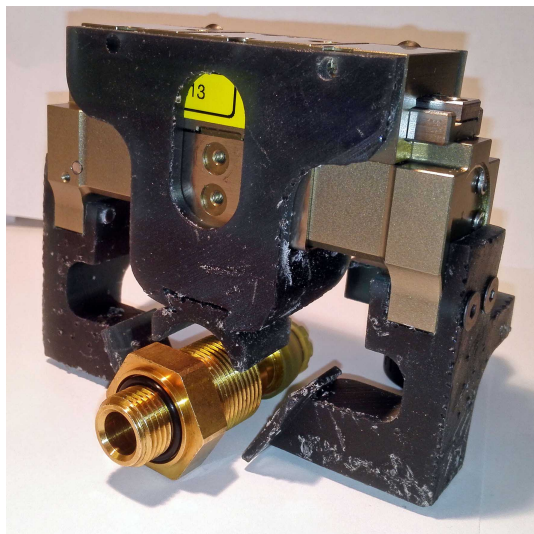


Figur 6.11: Visualisering av konsept 1

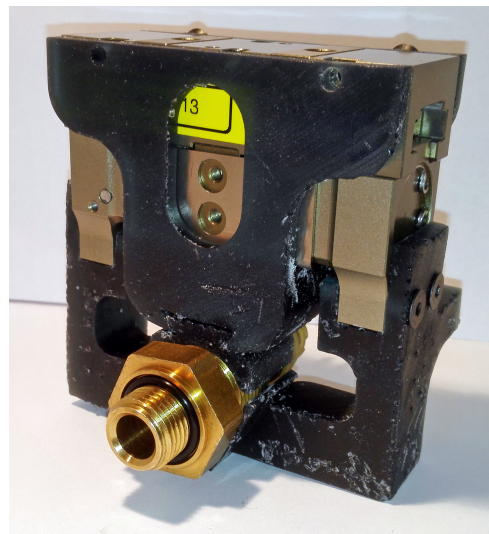
## Konsept 2 – en sentrerende griper

Konseptet tar utgangspunkt i problemet med dårlige inputdata fra vision-systemer, og forsøker å lage en griper som er robust mot dårlige koordinater; spesielt i griperens z-retning. Designet benytter seg av to generelle griperfingre som presser koblingen opp mot en sentreringsdel. Sentreringsdelen kan være spesiallaget for ulike koblingsstørrelser slik at en oppnår best mulig kontaktflate, og kan skiftes ved omstillinger. Griperfingrenes vinklede overflate gjør at koblingen gripes såfremt fingrene er lavere enn koblingens senter.

Basert på den initielle ideen ble det utviklet en fungerende prototyp som også ble 3D-printet og funksjonstestet. Den produserte griperen vises i figur 6.12. Griperen er laget for å gripe alle koblinger som har en gripeflate på minst 20 mm i koblingens z-retning, og kan gripe koblingshus med en ytre diameter helt ned mot 8 mm. For ulike diametre er det nødvendig å bytte ut sentreringsdelen som er montert midt mellom griperarmene med to M3-skruer. Testing viste gode griperegenskaper, men designets største ulempe er at koblingens senter forandrer posisjon for koblinger med ulike ytre diametre. Dette kan enten kompenseres med sentreringsdelens design, eller når systemet programmeres.



(a) Griperen i åpen posisjon. God avstand mellom griperfingre sørger for robusthet mot feilposisjonering av koblingshuset



(b) Griperen i lukket posisjon. Griperfingrene har løftet koblingshuset og presser huset mot sentreringsdelen

Figur 6.12: Funksjonell prototyp av konsept 2 produsert med additiv tilvirkning

## Konsept 3 – innvendig griping

Med unntak av plugger, så er koblingenes innvendige hulrom felles for alle KA sine produkter. Dette gjør det mulig å gripe koblingshus med svært ulik utvendig geometri så lenge de har innvendige likhetstrekk. For KA sine koblinger er den innvendige geometrien som oftest jevn, og med en griper som passer for innvendig griping av koblinger for ek-

sempelvis 12 mm rør så kan alle 12 mm koblinger gripes. Ulike kommersielle griper vises i figur 6.13. Begge griperene fra Schunk er i realiteten ikke relevante for denne oppgaven siden de er designet for større objekter, men funksjonsprinsippet kan benyttes. Griperen fra MF Automation kan leveres for griping av objekter ned i indre diameter 8,6 – 10 mm (MF Automation, 2017). Det vil si at denne griperen bare er relevant for et begrenset utvalg av KA sine produkter.



(a) Schunk sin griper «PZH-SF» (b) Schunk sin griper «LOG» (c) Griper fra MF Automation

Figur 6.13: Ulike griper som kan gripe objekter innvendig. Griperene i figur 6.13b og 6.13c er spesielle med sitt elastiske materiale som utvider seg slik at griperen holder objektet fast. Bildene er hentet fra Schunk og MF Automation sine nettsider

En utfordring ved bruk av indre griper for KA sine produkter er de små dimensjonene. KA har koblinger for rør helt ned i 4 mm, og indre griping av disse produktene kan bli umulig som følge av rene fysiske begrensninger.

*Et flertall av koblingene som er aktuelle for montasjecellen i kapittel 5.5 er tunge og lange koblinger produsert i messing. De har store og gode overflater som egner seg for ytre griping, og innvendig griping sees på som mindre relevant. Dette konseptet er derfor ikke blitt utforsket i like stor grad som konsept 1 og 2, men prinsippet sees på som såpass viktig at det gir mening å inkludere i vurderingen.*

## 6.4 Griper for koblinger med swiveler

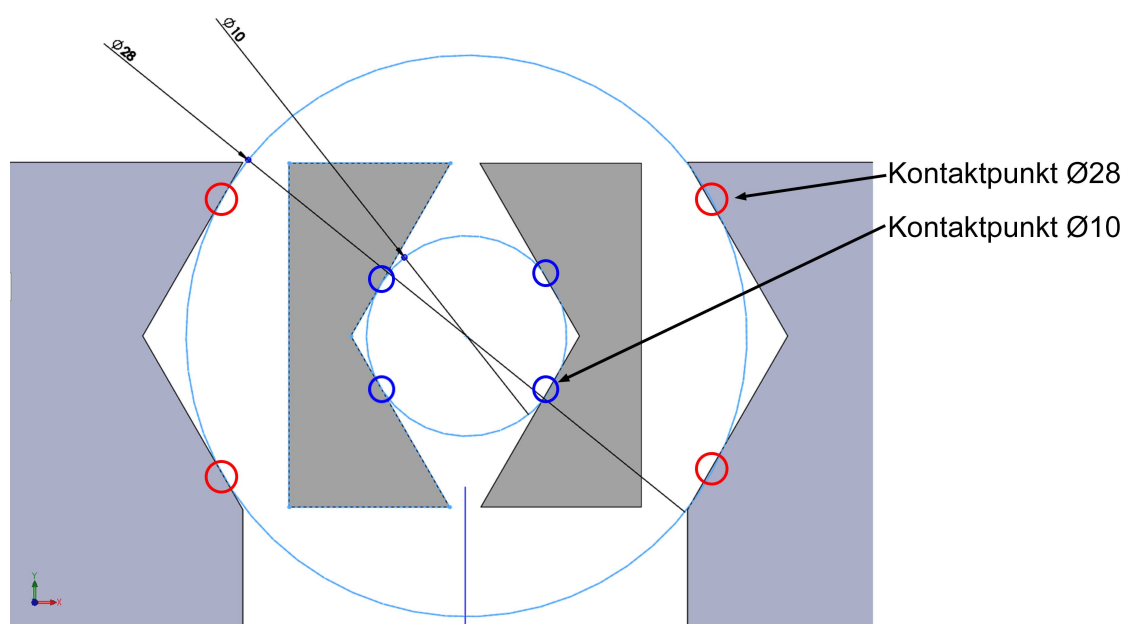
I dette kapitlet videreutvikles konsept 1 og konsept 2 til en ferdig griper som tilfredstiller kravene definert i kapittel 6.1.

Griperene visualisert i figur 6.11a og 6.11b ble 3D-printet i likhet med griperen i figur 6.12. De forskjellige prinsippene ble testet i praksis på ulike koblinger fra KA. Oppsummert oppnådde alle griperkonseptene god sentrering om koblingens x- og y -akse, men som ventet presterte konsept 2 best sentrering i vertikal retning. Konsept 2 klarte dessuten å sikre best grep om koblingen, og var robust mot ytre krefter. Etersom materialet benyttet av 3D-printeren har relativt dårlige mekaniske egenskaper var det tydelig hvordan griperkreftene deformerte prototypene. Viktigheten av robusthet og stivhet ble svært tydelig under testingen.

Den nye griperen tar utgangspunkt i to enkle griperfingre som benyttet i konsept 1, men forsøker å inkludere de gode egenskapene fra den sentrerende griperen i konsept 2. Det innebærer vinklede griperflater som takler feil inputdata, og et robust design. Som aktuator besluttet det å benytte griperen KGG 80-30 fra Schunk, og lage passende griperfingre etter denne griperens krav. KGG 80-30 er designet for håndtering av arbeidsstykker opp mot 660 gram, har en egenvekt på 250 gram, åpner hver arm med 15 mm og lukker griperen med en kraft på 130 newton. Griperen er pneumatisk og har i følge Schunk et robust design. Om det viser seg i ettertid at det behøves bedre kontroll av systemet kan den pneumatiske griperen byttes med en elektrisk parallelgriper, og på den måten oppnå bedre kontroll og styring. Potensielle modeller fra Schunk er gripermodellene «PG» og «EGP».

## Kontaktpunkter

Sentreringsdelen fra konsept 2 er fjernet, og erstattes med vinklede griperfingre som sørger for fire kontaktpunkter. Koblingens senter vil nå posisjoneres i samme punkt, uavhengig av koblingens ytre diameter. Vinklingen sørger dessuten for at koblingen kan gripes med en viss feilmargen i vertikal retning. De to flatene har begge en vinkling på 30 grader; et resultat av å designe griperflaten for objekter fra 10 til 28 mm i diameter. Figur 6.14 viser hvordan kontaktpunktene blir for koblinger med ytre diameter på 10 og 28 mm. Illustrasjonen viser dessuten hvordan koblinger med ulik diameter sentreres i et felles punkt. I koblingens z-retning er det ønskelig med så lange kontaktlinjer som mulig, men dette begrenses av koblingshusenes størrelse.

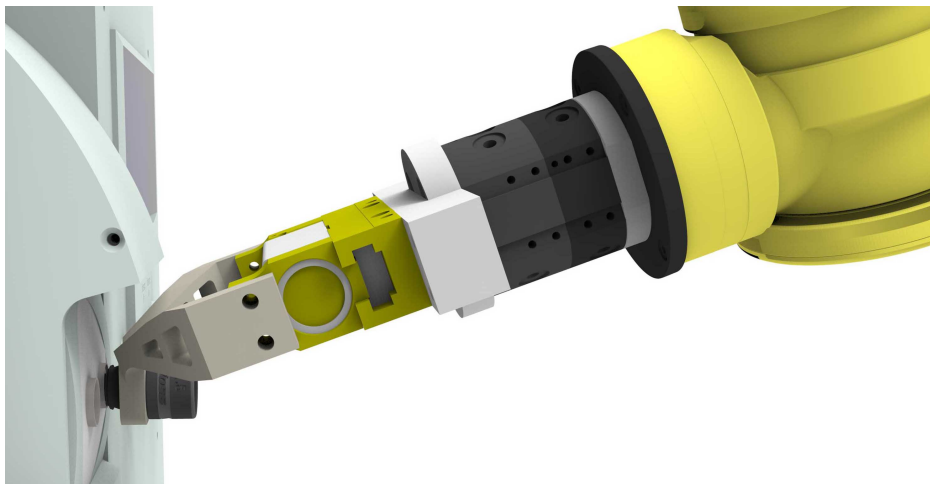


Figur 6.14: Kontakt mellom griper og koblinger med diameter 10 og 28 mm. De grå flatene illustrerer griperfingrene mens koblingens overflate er illustrert i lyseblått



## Griperfingre

Design av griperfingrene vil avgjøre hvordan roboten må bevege seg for å utføre oppgavene i montasjecellen. Eksempelvis vil leddenes posisjon måtte rette seg etter griperens posisjon både når koblingshus skal gripes fra et transportbånd, og ved bruk av ulike fiksturer og maskiner. Figur 6.15 viser hvordan griperfingrene i konsept 1 er designet med en vinkel som lar roboten presse koblingshuset inn i maskinen for o-ringmontasje uten å kollidere med omkringliggende utstyr. Vinkelen vil i tillegg redusere sannsynligheten for å støte på singulariteter; en problematikk bedre beskrevet i kapittel 2.4. Etter testing viser det seg at 30 graders vinkling mellom koblingens z-akse og griperkroppen gir tilstrekkelig plass for håndtering av koblingshus og betjening av montasjemaskinen. Griperfingrenes lengde begrenses av Schunk sine momentbegrensninger for de ulike griperene. Kontakflatene er dessuten justert i forhold til resten av griperfingrene slik at griperen ikke kolliderer med omkringliggende koblingshus der gripingen utføres.



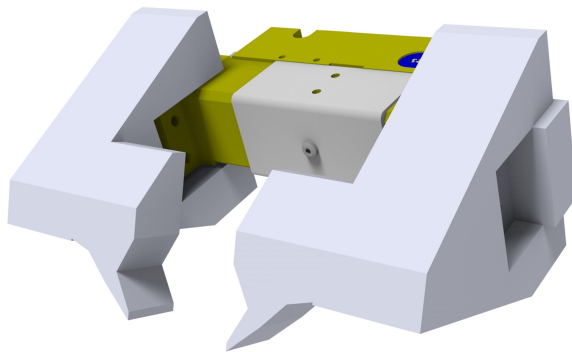
Figur 6.15: Vinkling av griper muliggjør betjening av montasjemaskinen

## Endelig design

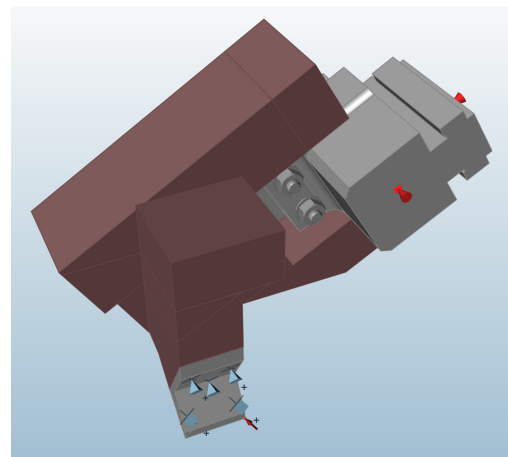
### Topologioptimalisering

For å utvikle det endelige designet er det benyttet topologioptimalisering for å redusere vekt og optimere stivheten til griperfingrene. Topologioptimalisering er en matematisk metode som beregner den optimale topologien innenfor et bestemt designområde med gitte begrensninger. Prosessen starter ved først å designe en CAD-modell som oppfyller dimensjonskrav, og som er grunnlag for designområdet. Figur 6.16a viser CAD-modellen som ble benyttet. Den er tilpasset designkriteriene, men er samtidig så stor som mulig for å gi topologioptimaliseringen størst mulig designfrihet. CAD-modellen importeres deretter i topologioptimaliseringsprogrammet Inspire fra SolidThinking. I inspire defineres materialet, krefter, utbøyningsbegrensninger og hva som er designområdet. Designområdet illustreres med burgunderfarge i figur 6.16b. Programmet beregner den

optimale løsningen utifra begrensningene og genererer en røff struktur, en slik struktur vises i figur 6.17a. Griperfingrene er designet for å kunne benyttes av Schunk sin griper med en maksimal utbøyning på 0,2 mm, og optimaliseringsprosessen har generert strukturen utifra en rekke ulike lasttilfeller; inkludert uforutsette hendelser som kollisjon med transportbånd og montasjemaskiner. For å undersøke strukturens mekaniske ytelse er det gjennomført en FEM-analyse. Figur 6.17b viser eksempelvis maksimal utbøyning ved en simulert kollisjon.

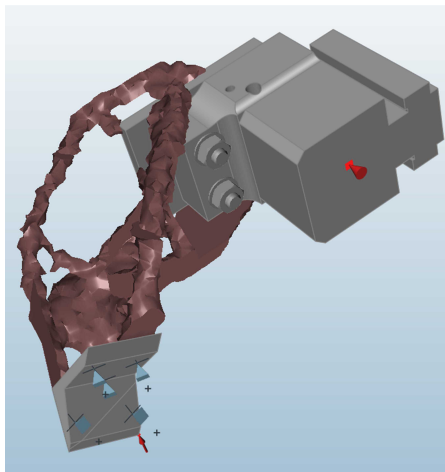


(a) CAD-modell som utgangspunkt for topologi-optimalisering

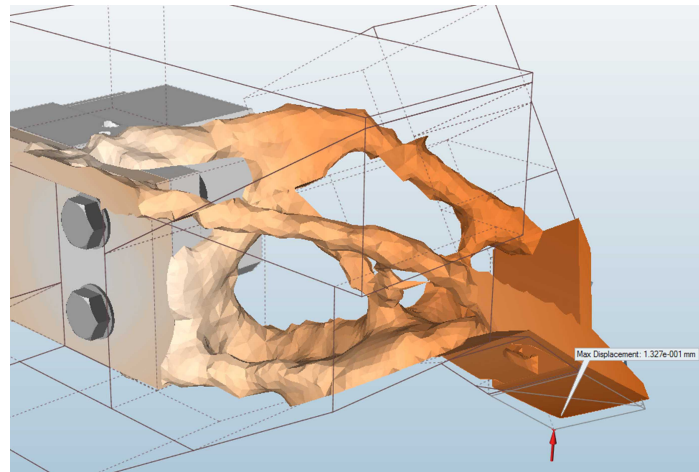


(b) Designområdet illustrert i burgunder-rødt

Figur 6.16: Modell for topologi-optimalisering



(a) Generert struktur

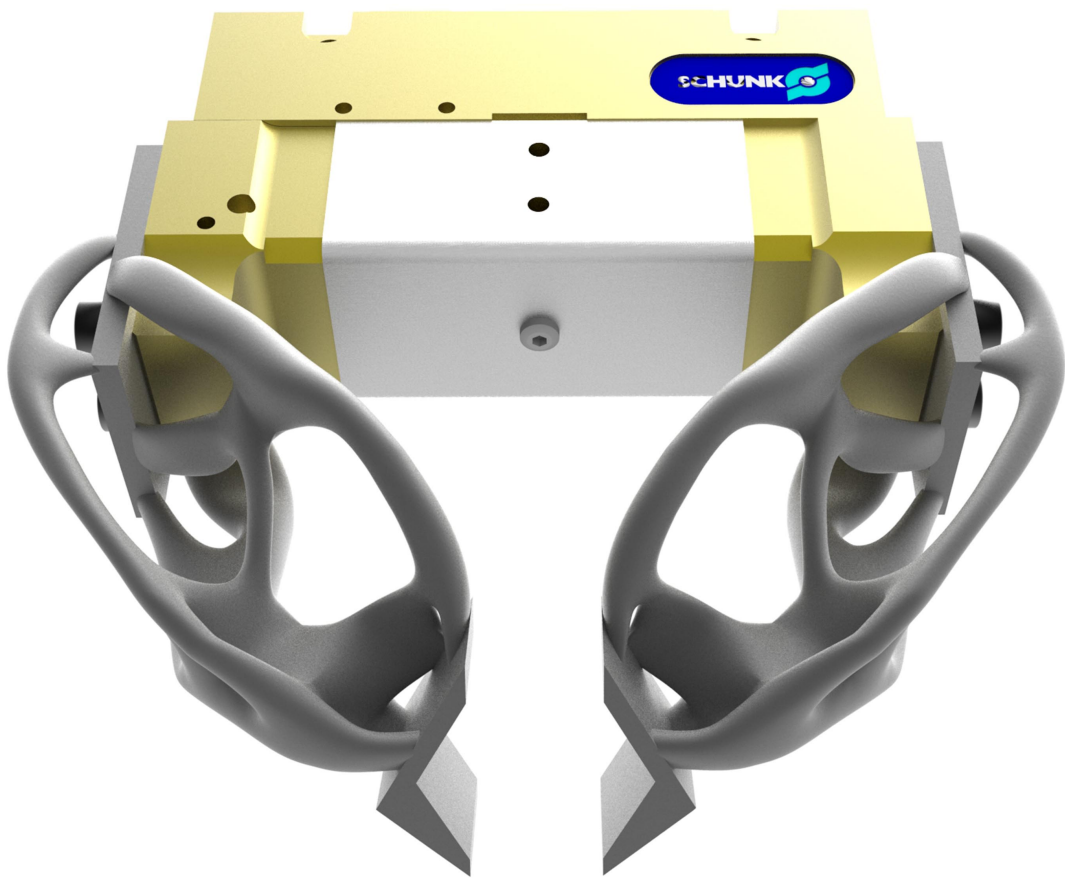


(b) FEM-analyse av en potensiell kollisjon

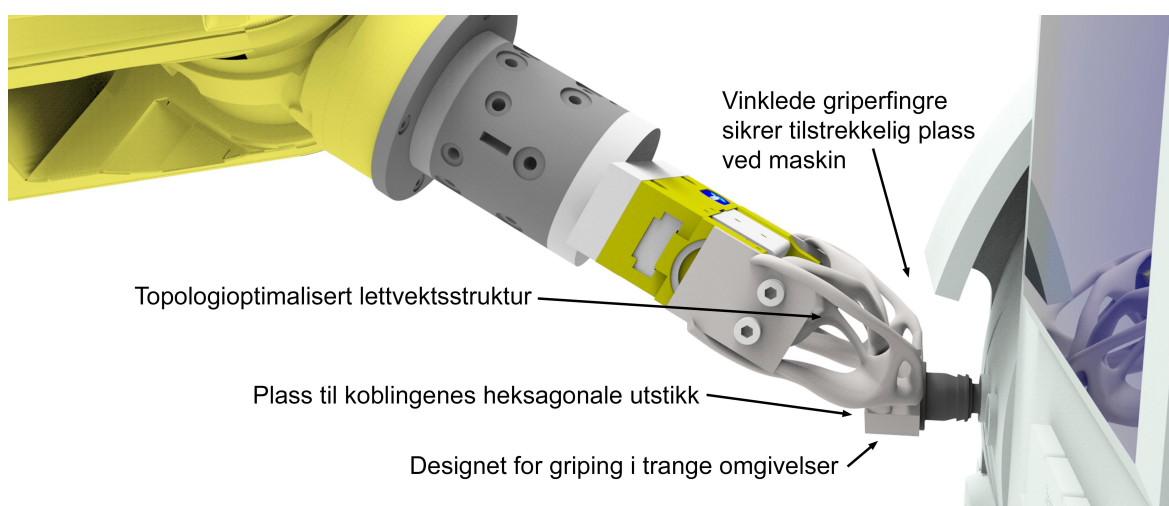
Figur 6.17: Topologi-optimalisering i Inspire

Den grove strukturen i figur 6.17a må raffineres og justeres før en endelig stl-fil kan genereres. Stl-filen kan benyttes for å produsere griperfingrene additivt. De ferdige griperfingrene vises i figur 6.18 og 6.19 montert på den pneumatiske griperen fra Schunk. Griperfingrene er designet for å lages i 316L rustfritt stål fra Concept Laser. Hver finger veier 84,6

gram og griperen er laget for å kunne gripe koblingshus fra KA med ytre diameter fra 10 til 28 mm, vekt fra 4 til 200 gram og lengde fra 20 til 150 mm.



Figur 6.18: Endelig griperdesign



Figur 6.19: Sentrale egenskaper ved det endelige griperdesignet

## Produksjon

De ferdigdesignede griperfingrene ble først produsert additivt i plast for å teste funksjonen. Deretter ble griperfingrene laget i 316L rustfritt stål i NTNU sin Concept Laser M2 Laser Cusing pulverbad-maskin. Maskinen benytter en 200W laser for å smelte pulver i et pulverbad for å bygge opp delen. Figur 6.20a viser den endelige griperfingren produsert i plast. I figur 6.20b er et bilde av produksjonen i M2-maskinen. I bildet er laseren tydelig nede til venstre i bildet. I vedlegg C er det vedlagt en video som viser prosessen i M2-maskinen.



(a) Griperfinger produsert i plast



(b) Produksjon av griperfinger i metall

Figur 6.20: Produksjon av endelige griperfingre

## Videre utvikling av griperdesignet

Den endelige griperen presentert i figur 6.18 er laget i stål. Stål mot messing har en friksjonskoeffesient ned mot 0,35, og griperkraften er 130 N. En enkel beregning viser at griperens kraft sørger for at en grepet kobling kan motstå omtrent  $0,35 \times 2 \times 130\text{N} = 91\text{N}$  i z-retning før posisjonen endres ([Engineering Toolbox, 2017](#)). Utifra kraftbehovet ved bruk av Ohrmann-maskinen er 91 N tilstrekkelig. Likevel kan det være ønskelig å utstyre griperfingrene med en gummioverflate for å forbedre grepet, og gjøre systemet mer robust for søl av smørende væsker som silikon.

Kontaktflatene på den produserte griperen vil mest sannsynlig ikke føre til en pålitelig sentrering av union-koblingene som har en svært ujevn overflate. Utfordringen kan muligens løses med en «svampaktig» kontaktoverflate som absorberer ujevnheter, eller en mer spesiallaget kontaktflategeometri. Det er nødvendig å utføre testing for å stadfeste, og eventuelt løse denne utfordringen.

# Kapittel 7

## Praktisk testing

### 7.1 Lokasjon og griping av koblingshus basert på CAD-input

Montasjecellen utviklet i kapittel 5.5 benytter seg av godt utprøvde og sikre maskiner for å utføre montasje av o-ringer og beskyttelseshetter på koblingshus. Innmating er derimot et større usikkerhetsmoment. Koblingshusene blir matet inn i bulk, og en fleksibel industrirobot skal ved hjelp av et visionsystem lokalisere, gripe og føre koblingshuset med stor nøyaktighet. Det er kritisk at lokasjon-griper-systemet sikrer både robusthet og kvalitet, parallelt med å være fleksibelt. KA har ikke benyttet et slikt produksjonssystem tidligere, og det er derfor en viss usikkerhet knyttet til løsningen.

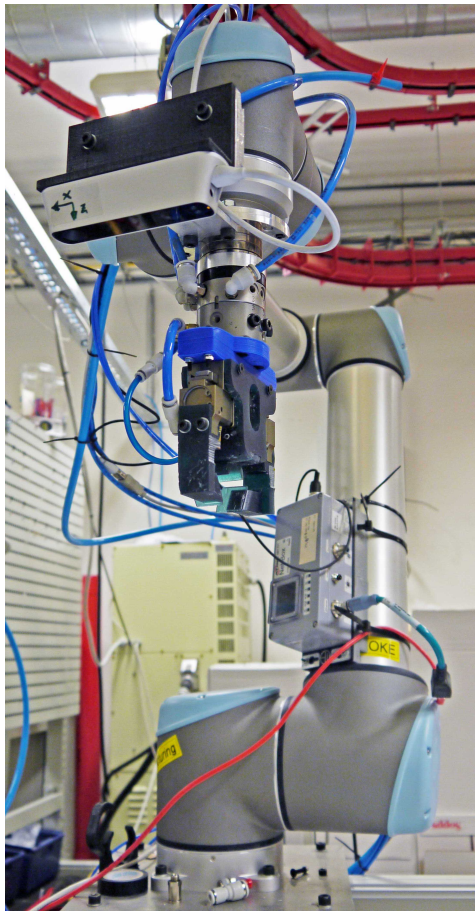
For å lære mer om systemet som skal gripe og håndtere koblingshus i montasjecellen er lokalisering ved bruk av vision, og griping blitt testet i praksis. Software som er laget er dessuten generisk, og kan benyttes på ulike koblingshus uten å måtte omprogrammeres. Dette kapitlet beskriver laboppsett og resultater av testingen.

### 7.2 Utstyr

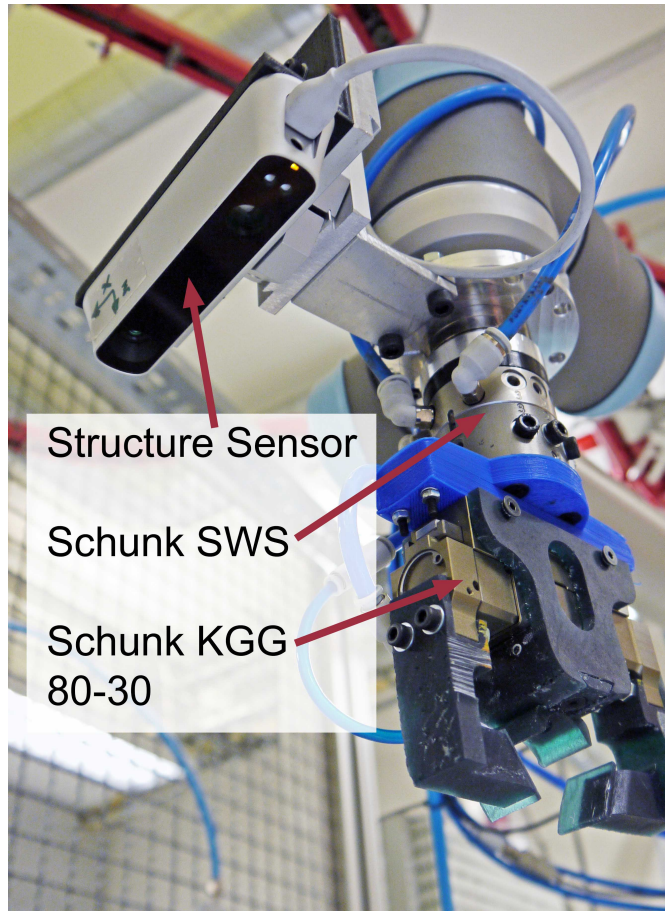
Arbeidet foregikk i NTNU og SINTEF sitt laboratorium ved NTNU i Trondheim, avdeling Valgrinda. Utstyr som ble benyttet for å utføre testene er følgende:

- Industriroboten «UR 10» produsert av Universal Robots med tilhørende controller
- 3D-kameraet «Structure Sensor» fra Occipital
- Schunk sin pneumatiske griper «KGG 80-30» med 3D-printede griperfingre
- Visionsoftware «Halcon 12» produsert av MVTec
- PC med operativsystemet Linux, samt programmene Python og Halcon

Utstyret vises i figur 7.1.



(a) UR10 industrirobot



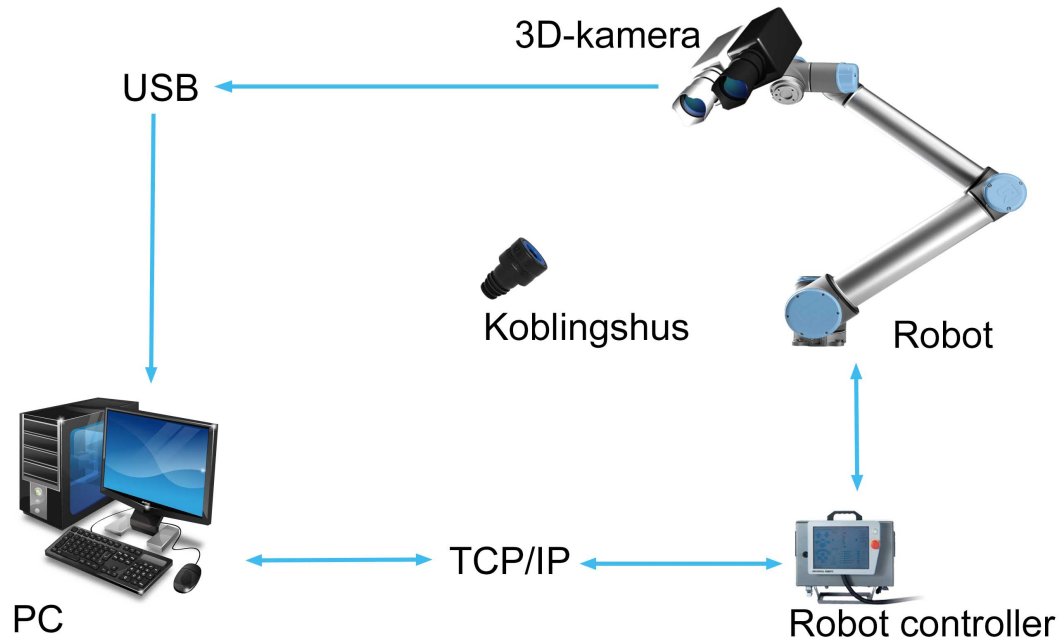
(b) nærbilde av robotens EOAT

Figur 7.1: Laboppsett for testing av lokasjon og griping av koblingshus

UR10 er en samarbeidende robot som kan benyttes ved lave hastigheter uten andre sikkerhetssystemer enn indre sensorer som registrerer kollisjoner. Roboten har i følge produsenten en repeterbarhet på 0,1 mm, kan løfte 10 kg og har en rekkevidde på 1300 mm. 3D-kameraet er montert på robotens håndledd, og er kalibrert ved hjelp av hand-eye-calibration. Griperen er montert på roboten ved hjelp av Schunk sitt hurtigkoblingssystem «SWS» og en egenprodusert adapterplate. 3D-kameraet er i utgangspunktet et ordinært forbrukerprodukt, og er laget for å benyttes i kombinasjon med Apple iPad av privatpersoner som ønsker 3D-bilder av større objekter. Prisen er 379 dollar; noe som er svært lavt sammenlignet med industrielle sensorer. Kvaliteten er dessuten mye dårligere enn profesjonelle kameraer laget for bruk i industrien. Sensoren er derfor ikke spesielt velegnet for deteksjon av små koblinger, men ble benyttet i mangel av et bedre alternativ. Structure Sensor benytter seg av strukturert lys for å samle 3D-data. Les mer om teknologien i kapittel 2.3.

## 7.3 Fremgangsmåte

Som nevnt er målet med testingen å lokalisere koblingshus ved hjelp av et visionsystem, gripe koblingen og ha kontroll på lokaliseringen. Systemet illustreres av figur 7.2; informasjon fra 3D-kameraet prosesseres av software på PC før instruksjoner sendes gjennom robotens kontrollenhet for å styre roboten.



Figur 7.2: Systemets informasjonsflyt

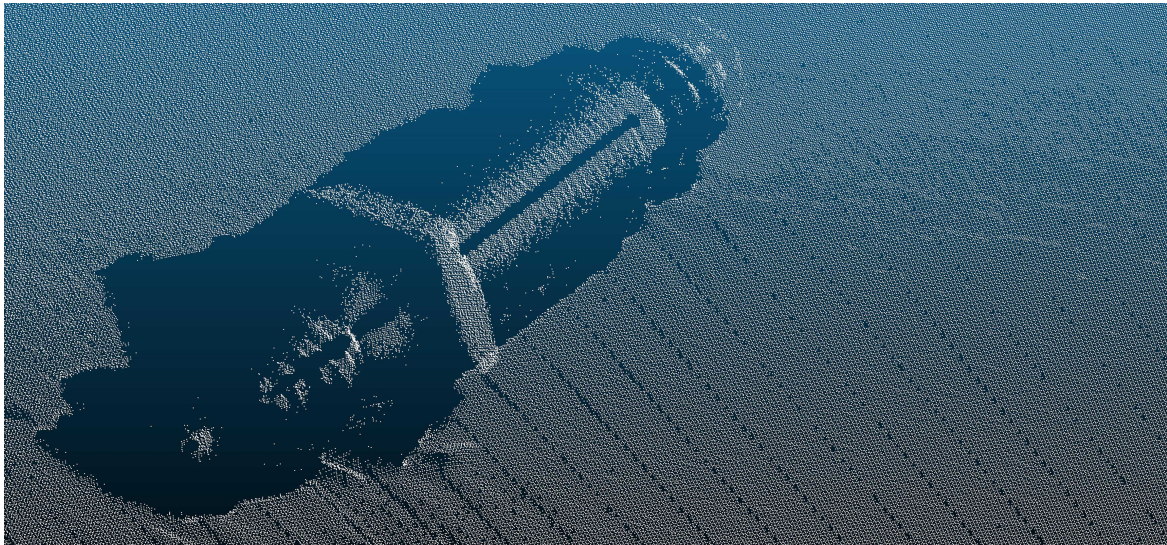
### Prosessen steg for steg:

1. Robot beveger seg til en posisjon for å ta bilde, og kameraet tar et punktskybilde
2. Bildeinformasjonen filtreres, og det kjøres algoritmer som forsøker å lokalisere koblingshuset i bildet. Lokalisering gjøres på bakgrunn av informasjon fra en CAD-fil av koblingen
3. Koordinatene til den lokaliserte koblingen brukes som input til styring av roboten. Roboten beveger seg til koordinatene og griper koblingen

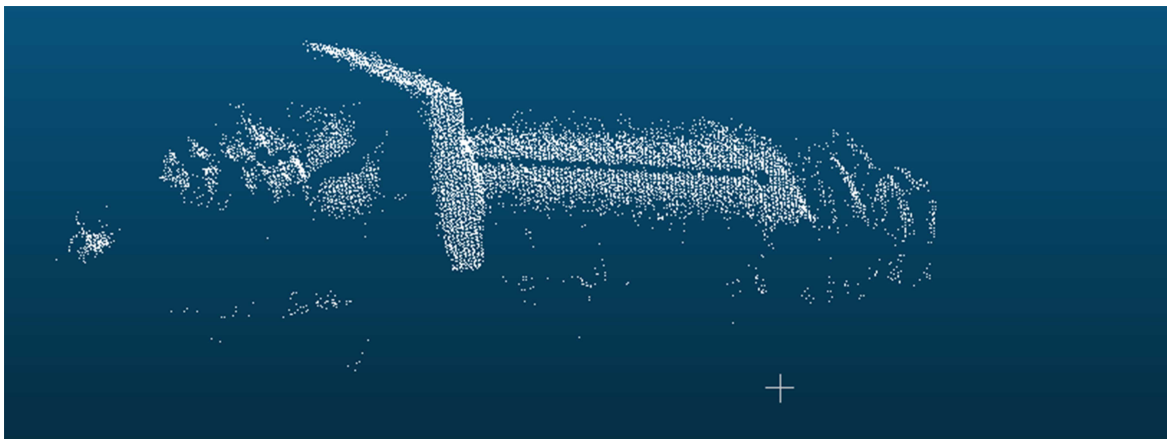
### Punktskyer

Bildene 3D-kameraet tar er i form av punktskyer, og består av et stort antall punkter med individuelle koordinater i et tredimensjonalt rom. Ulike versjoner av et punktskybilde tatt med 3D-kameraet Zivid fra produsenten Zividlabs vises i figur 7.3, 7.4 og 7.5. Bildet er av en Double Bulkhead Swivel som ligger på et bord, koblingen vises i et standard bilde helt til venstre i figur 6.1. Zividkameraet har en svært god oppløsning og nøyaktighet, og

punktskyene blir tilsvarende gode. Til tross for ukontrollert belysning, og en maskinert messingkobling som er svært reflekativ, så er punktskybildet av høy kvalitet. Det er eksempelvis lite støy, og i figur 7.4 er det mulig å skimte detaljer som koblingens gjengede overflate. Det er vedlagt punktskybilder tatt med Zivid-kameraet i vedlegg C.



Figur 7.3: Ufiltrert punktsky av kobling liggende på et bord



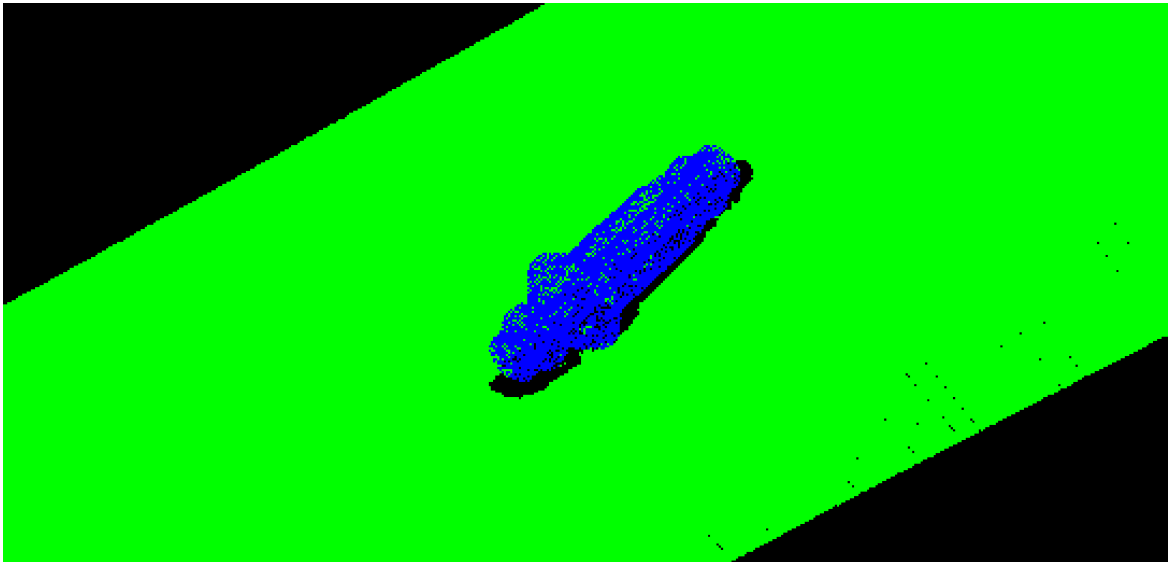
Figur 7.4: Punktsky av kobling. Bordet i figur 7.3 er filtrert vekk

## Lokalisering

Den store fordelen med å benytte 3D-vision og punktskybilder for å detektere objekter er at lokaliseringsprogrammet enkelt kan anvende CAD-data som input. Såfremt en har CAD-filer av de ulike koblingene kan det samme programmet benyttes for å lokalisere alle KA sine ulike koblinger. Det eneste som endres ved både omstilling og introduksjon av nye produkter er at programmet refererer til en ny CAD-fil. Kostnaden ved introduksjon av nye produkter er tilnærmet borte, og i følge definisjonen av fleksibilitet beskrevet i kapittel 2.2.4 presterer denne løsningen svært godt.



I forsøket ble Halcon sitt bibliotek benyttet for å utføre selve lokaliseringen. I programmet importeres først CAD-filen, og det lages en punktsky av modellen. Deretter lages det normaler i hvert enkelt punkt. Normalene blir generert basert på posisjonen til omkringliggende punkter, og det er disse vektorene som benyttes for å gjøre selve lokaliseringen. Punktskybildet fra kameraet kan nå importeres, og filtreres om nødvendig. Deretter genereres normaler, og de to bildene med punkter og normal kan nå benyttes av en algoritme som søker etter sammenfallende vektorer. Nøyaktigheten og krav til overenstemmelse kan justeres. Om programmet finner en match kan koordinatene til den lokaliserte koblingen sendes som output. Koordinatene som ble benyttet i forsøket er definert av CAD-filens koordinatsystem. På denne måten kan en med CAD-filen definere hvor på koblingshuset roboten skal gripe. Et resultat av en svært vellykket match vises i figur 7.5. Her er de grønne punktene fra kamerabildet, og de blå er fra CAD-modellen. Bordet i dette bildet er ikke filtrert vekk.

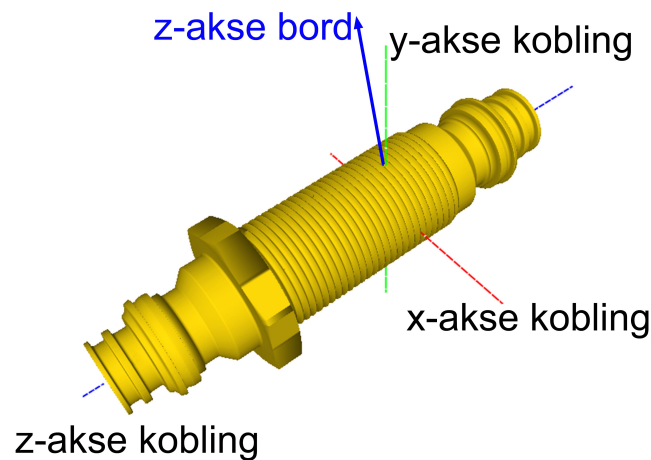


Figur 7.5: Punktsky fra CAD er matchet med punktsky tatt med et Zivid-kamera. Blå punkter er fra CAD mens grønne er fra Zivid. Dette er en svært god match

## Griping

Output etter lokalisering er en matrise med både posisjon og rotasjon av koblingshuset. I prinsippet kan koordinatene benyttes direkte ved å be roboten gå til dette punktet, men i vårt tilfelle er det ikke mulig. Koblingshuset er symmetrisk om z-aksen, og x- og y-aksens retning er derfor vilkårlig. Den eneste retningen som kan lokaliseres med sikkerhet er koblingens z-akse. Utfordringen ble løst ved å «konvertere» problemet til 2D. Ettersom koblingen alltid vil ligge flatt på bordet der koblingen lokaliseres er det et faktum at bordets vertikale akse vil være tilnærmet normal på koblingens z-akse, se figur 7.6. Ved å ta kryssproduktet mellom bordets z-akse og koblingens z-akse finner en x-aksen. Til slutt tar en kryssproduktet av koblingens z-akse og x-aksen slik at den siste aksene står nor-

malt på  $zx$ -planet. Koblingens rotasjon er nå bestemt, og roboten kan sendes for å gripe koblingen fra en bestemt, ønsket orientering.



Figur 7.6: Koblingens koordinatsystem i forhold til bordets z-akse

## Programmering

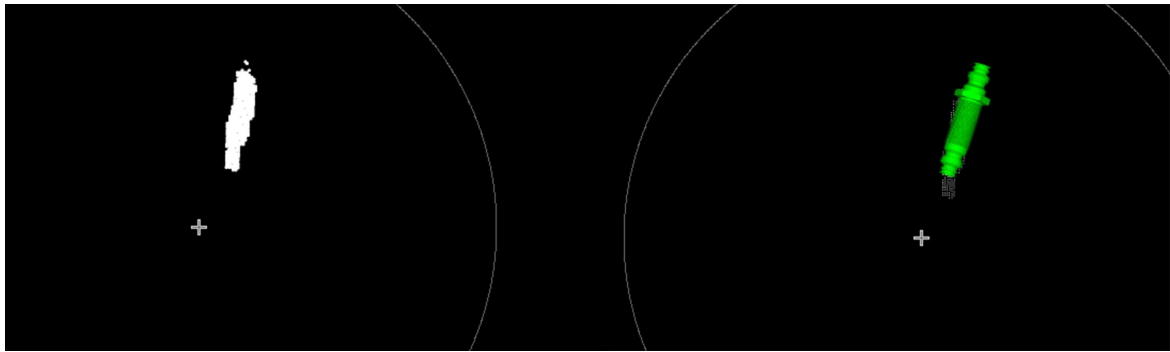
Programmeringen er gjort med programmeringsspråket Python. For å styre UR10-roboten er det benyttet biblioteket «urx» utviklet av Olivier Roulet-Dubonnet som arbeider for SINTEF. Selve bildebearbeidingen gjøres som nevnt ved å benytte operatører fra programmet Halcon. Programmeringen ble gjort i samarbeid med Alvaro Capellan som arbeider for SINTEF.

Kildekode fra lokalisering som gir resultatet i figur 7.5 er vedlagt i vedlegg A.1. Hovedprogrammet som ble benyttet for å utføre testen vises i vedlegg A.2. I tillegg er alle scriptene som ble benyttet vedlagt som digitale vedlegg i vedlegg C.

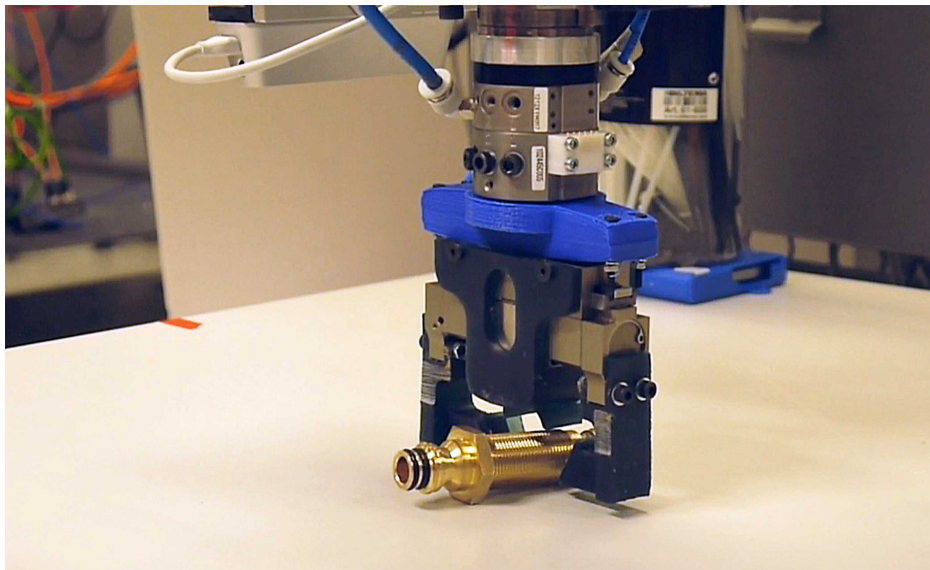
## 7.4 Resultater

To videoer vedlagt som digitalt vedlegg viser hvordan systemet fungerte i praksis. På videoene kan en se hvordan et koblingshus plasseres tilfeldig på et arbeidsbord, delen lokaliseres, og roboten beveger seg deretter for å gripe koblingen. Avslutningsvis føres koblingen mot en fikstur for å illustrere hvordan griperen sørger for nøyaktig orientering av koblingshuset. En skjermdump fra en av videoene vises i figur 7.8.

Systemet fungerte, men robustheten er ikke tilfredsstillende. Det kommer i stor grad av dårlig ytelse fra 3D-kameraet. Sensoren som ble benyttet presterer langt dårligere enn Zivid-kameraet, og matchingen gjort i Halcon var derfor svært upresis. Figur 7.7 viser punktskyen til venstre med hvite punkter, og Halcon sin lokalisering til høyre. Den grønne modellen er CAD-modellen. Det er tydelig hvor unøyaktig punktskyen er sammenlignet bildene i figur 7.4, og lokaliseringen blir derfor tilsvarende dårlig.



Figur 7.7: Punktsky fra Structure-sensoren til venstre. Halcon sin match vises til høyre, CAD-modellen illustrert i grønn farge



Figur 7.8: Skjermdump av video fra den praktiske testingen

## Videre testarbeid

Om ønskelig kan systemet som ble testet optimeres for å yte bedre, men den mest åpnebare forbedringen vil være å bytte ut 3D-sensoren som presterte dårlig. Andre potensielle tiltak er:

- Kontrollere lyssetting og forsøke andre kameravinkler for å forbedre punktskyen
- Optimere parameterene Halcon benytter for å lokalisere koblingen
- Lage en forenklet CAD-modell som samsvarer bedre med med punktskyen 3D-kameraet makter å lage. Eksempelvis fjerne gjenger modellen ettersom Structure-sensoren ikke fanger opp gjengene

2D-vision og bruk av eksempelvis blob detection eller template matching ville mest sannsynlig også fungert for å detektere koblingshusene. Dette har ikke blitt testet siden det var

ønskelig å benytte CAD-filer som input slik at ett program kan brukes på mange ulike produkter.

*Programvare og griper presentert i dette kapitlet er laget for å teste prinsippet med lokalisering og griping av koblingshus basert på CAD-input, og ikke for bruk i en industriell setting.*

# Kapittel 8

## Oppsummering

### 8.1 Oppsummering av utført arbeid

For å kunne løse oppgaven på en tilfredstillende måte har teori om lean, automatisering, robotikk og computer vision blitt gjennomgått. I tillegg er det samlet informasjon fra tidligere prosjekter der et utvalg er gjengitt i kapittel 2. Det har dessuten blitt utført et stort arbeid med å samle inn informasjon om KA sine produkter, produksjon og spesielt montasjeprosessene. Dette er presentert i kapittel 3 og 4 med tanke på å kunne benyttes i KA sin videre utviklingsprosess. Under informasjonsinnhenting har Thor Thorstad hos KA vært spesielt viktig. Thorstad har med sine over 20 års erfaring, en unik kunnskap om montasje av koblinger. Denne kompetansen, kombinert med input fra forskerene Sebastian Dransfeld og Olivier-Roulet Dubonnet danner bakgrunnen for produksjonslayouten og montasjecellen som presenteres i kapittel 5.

Som grunnlag for den foreslåtte produksjonslayouten defineres det i kapittel 5 først flere designprinsipp. Ulike konsepter for fleksibel montasje diskuteres, og en spesifikk montasjecelle designes i kapittel 5.5. Montasjecellen er utformet for å montere swiveler på alle produkter med denne egenskapen. Det blir i tillegg diskutert alternative layout og ulike potensielle teknologiske løsninger. Det er også gjennomført en økonomisk analyse av den foretrukne cellen, og parallelt med utviklingen er produksjonsflyten simulert i Visual Components.

Montasjecellen for swiveler er avhengig av å kunne lokalisere, gripe og orientere ulike koblingshus lagret i bulk. Å utføre dette på en tilfredstillende måte er krevende ettersom komponentene som skal gripes er små, ujevne og med varierende geometri. Det stilles dessuten høye krav til nøyaktig orientering av komponentene. På bakgrunn av dette er potensielle griperdesign undersøkt i kapittel 6, og en fungerende generisk griper er designet og produsert. I kapittel 7 testes griping av koblingshus ved bruk av vision, og lokalisering med en generisk kode og input fra CAD-modeller. Med denne løsningen kan prosessen standardiseres slik at den enkelt, og med en lav kostnad, kan benyttes av fremtidige fleksible montasjeceller.

## 8.2 Oppsummering av resultater

KA ønsker å automatisere en større andel av den manuelle montasjen. Hovedargumentene for dette er som følger:

1. Høye manuelle montasjekostnader
2. utfordringer med dårlig kvalitetssikring i den manuelle montasjen
3. Økende etterspørsel etter kundespesifikke produkter som i dag bare kan produseres manuelt

Etter å ha undersøkt KA sin produksjon ble det tydelig at et vidt spekter av ulike produkter monteres manuelt, og i realiteten var det behov for en montasjecelle som kan takle hvilken som helst kobling. I tillegg viste det seg at det totale årlige produksjonsvolumet av ulike lavvolumsprodukter i realiteten er ganske stort. Erfaringer viser dessuten at KA sine høye kvalitetskrav, store produktvariasjoner, og små komponenter gjør det utfordrende å kombinere fleksibilitet med nødvendig effektivitet, robusthet og kvalitetssikring. For å kunne gjøre et best mulig kompromiss er det derfor foreslått å dele den fleksible montasjen i fire ulike *proessorienterte* delmontasjer. Ved å gjøre dette kan kritiske prosesser som krever spesielt høy nøyaktighet utføres av spesialiserte maskiner, mens et fleksibelt styringssystem i kombinasjon med industriroboter, visionsystemer og kraftsensorer sørger for den nødvendige fleksibiliteten. Konseptet åpner dessuten for å utføre montasjen med en relativt lav taktid. Måten å separere produksjonen er ny i forhold til KA sin høyvolumsproduksjon som i dagens produksjon deles inn etter ulike produktgrupper. En negativ effekt av de differensierte montasjecellene er at enkelte produkter må delmonteres. Det vil øke transportbehovet, men også antall ganger koblingshusene må lokaliseres og gripes. Det argumenteres imidlertid for at den økte transporten kan motvirkes ved å benytte et smart felles transportsystem som dessuten muliggjør et felles automatisert pakkeanlegg. I tillegg kan det lages et standardisert system for *lokalisering, griping og orientering av koblingshus*. Ved å gjøre dette kan metoden gjenbrukes for fremtidige ulike montasjeceller til en lavere kostnad.

Den foreslåtte montasjecellen for swiveler er designet for å takle montasje av de 3 standard swivelstørrelsene, men også *et ubegrenset antall ulike koblingshus*. Cellen benytter et fleksibelt robotsystem med kraftsensorer, og et visionsystem for å håndtere koblingshusene. Robuste, kvalitetssikre spesialmaskiner utfører montasjen av o-ringene. Et foreløpig estimat av investeringskostnadene resulterer i en total kostnad på 2,5 millioner. Basert på simuleringer kan det forventes å oppnå en syklustid per swivel mellom 10 og 15 sekunder. Det tilsvarer i så fall omtrent 3 sekunder per monterte komponent. For en fleksibel montasjecelle for produksjon av små serier vurderes resultatene som gode. Usikkerhetsmomentet er hvor godt roboten presterer i samarbeid med montasjemaskinen når det kommer til nødvendig nøyaktighet, og dessuten hvor godt prosessen som

griper koblinger fra bulklagring fungerer. Å gripe komponentene, og ha kontroll på orienteringen er som nevnt en utfordrende, men samtidig svært viktig oppgave.

Griperutviklingen resulterte i topologioptimaliserte griperfingre optimert med utgangspunkt i å kunne brukes på flest mulige ulike koblingshus, men også for maksimal robusthet, brukervennlighet og kvalitetssikring. Griperen er designet for å kunne takle unøyaktig input fra visionsystemet, og i tillegg motvirke unøyaktigheten ved å rette opp koblingene og redusere antall frihetsgrader. Under utviklingsprosessen ble flere konsepter produsert ved additiv tilvirkning, og testet i praksis. Ett av konseptene ble dessuten testet i kombinasjon med en industririobot og et vision-system. Resultatene fra testene viste at det er mulig å lokalisere KA sine koblingsdeler, og å gripe koblingene på bakgrunn av dette. Lokaliseringen var noe unøyaktig, men griperen sørget for nøyaktig orientering i to av tre retninger. Programmet som utfører lokaliseringen er generisk, og benytter CAD-data som input. Det resulterer i at koden kan benyttes på flere koblingshus uten å måtte programmeres på nytt.

### 8.3 Videre arbeid

En vesentlig del av av arbeidet med oppgaven har fokusert på å samle informasjon og erfaringer som kan danne et godt grunnlag for utviklingen av en fleksibel montasjecelle. Det endelige målet er å realisere et fleksibelt montasjesystem, og det også hva videre arbeid vil dreie seg om.

Først og fremst bør det fra KA sin side gjøres noen strategiske valg om hvilken retning produksjonssystemet skal utvikles. I forbindelse med dette bør det dessuten gjør en mer detaljert gjennomgang av ulike produksjonsvolum, markedsutsikter og hvilke produkter som bør satses på fra et økonomisk standpunkt. Det vil resultere i et bedre beslutningsgrunnlag. Videre bør det gjøres noen teknologiske valg slik at systemet kan bygges på bakgrunn av en langsiktig strategi. Eksempelvis at det besluttes å bruke én bestemt robotleverandør, og ett bestemt visionsystem som skal programmeres med et fast programmeringsspråk. Slike avgjørelser danner en viktig ramme i forhold til den endelige designutviklingen av de ulike montasjecellene. Med faste rammer kan for eksempel det samme programmeringsbiblioteket benyttes for flere ulike montasjeceller, og kjente vision-system kan brukes flere ganger. I tillegg behøver operatørene bare å lære ett system, og forståelsen for systemet kan på denne måten bli bedre.

Skal det bygges videre på designforslagene presentert i kapittel 5 bør det gjøres tester av kritiske prosesser. I følge erfaringen fra tidligere prosjekter er det dessuten viktig å bygge en prototype av montasjecellen slik at løsningene kan testes grundig i praksis. Parallelt med utviklingen av montasjecellen for swiveler bør designet av de tre andre cellene også vurderes. Ved å gjøre dette kan en avdekke felles operasjoner slik at systemet som helhet er designet mot gjenbruk og bruk av standardiserte operasjoner. Dette vil spare ressurser, og samtidig gjøre det mulig å i større grad optimalisere operasjonene.

*Forslag til konkrete oppgaver som bør gjøres under «videre arbeid» er forklart avslutningsvis både i kapittel 5, 6 og 7. Kapitlene omhandler henholdsvis utvikling av montasjesystemet, griperutvikling, samt testing av lokalisering og griping av koblingshus.*



# Referanser

- E. Abele and A. Wörn. Reconfigurable Machine Tools and Equipment. In H. A. ElMaraghy, editor, *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, Springer Series in Advanced Manufacturing, pages 111–125. Springer London, 2009. ISBN 978-1-84882-066-1 978-1-84882-067-8. URL [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84882-067-8\\_6](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-84882-067-8_6). DOI: 10.1007/978-1-84882-067-8\_6.
- Beno Benhabib. *Manufacturing*. Manufacturing Engineering and Materials Processing. CRC Press, July 2003. ISBN 978-0-8247-4273-7. URL <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/9780203911204>.
- G. Boothroyd. *Assembly Automation and Product Design, Second Edition*. CRC Press, June 2005. ISBN 978-1-4200-2735-8. Google-Books-ID: 1uTLBQAAQBAJ.
- S. Dransfeld. *Measurement and Supervision in Automated Production*. PhD thesis, NTNU, 2007.
- E24. 10 norske bedrifter flagger hjem: – billigere og bedre enn kina, 2016. URL <http://e24.no/naeringsliv/arbeidsliv/10-norske-bedrifter-flagger-hjem-billigere-og-bedre-enn-kina/23888671>. (Accessed on 02/18/2017).
- H. A. ElMaraghy, editor. *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer London, London, 2009. ISBN 978-1-84882-066-1 978-1-84882-067-8. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-067-8>. DOI: 10.1007/978-1-84882-067-8.
- Engineering Toolbox. Friction and friction coefficients. [http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html), 2017. (Accessed on 05/22/2017).
- Fanuc. Fanuc LRMate 200iD Industrial Robot. <http://www.fanuc.eu/hu/en/robots/robot-filter-page/lrmate-series/lrmate-200-id>, 2017a. (Accessed on 05/02/2017).

- Fanuc. Collaborative industrial robot fanuc cr-35ia. <http://www.fanuc.eu/uk/en/robots/robot-filter-page/collaborative-robots/collaborative-cr35ia>, 2017b. (Accessed on 03/23/2017).
- R. B. Fisher, T. P. Breckon, K. Dawson-Howe, A. Fitzgibbon, C. Robertson, E. Trucco, and C. K. I. Williams. *Dictionary of Computer Vision and Image Processing*. John Wiley & Sons, Nov. 2013. ISBN 978-1-118-70681-7. Google-Books-ID: TaEQAgAAQBAJ.
- D. A. Forsyth and J. Ponce. *Computer Vision: A Modern Approach: A Modern Approach*. Pearson Education Limited, Jan. 2015. ISBN 978-1-292-01408-1. Google-Books-ID: pAWpBwAAQBAJ.
- GTAI. German trade and invest, 2017. URL <https://industrie4.0.gtai.de/INDUSTRIE40/Navigation/EN/Topics/Industrie-40/what-is-it.html>. [Online; accessed 16-February-2017].
- A. Gupta, S. Arora, and J. Westcott. *Industrial Automation and Robotics: An Introduction*. Mercury Learning & Information, 2016. ISBN 9781938549304. URL <https://books.google.no/books?id=7va-MgEACAAJ>.
- M. Hayes, M. Husty, and P. Zsombor-Murray. Singular configurations of wrist-partitioned 6r serial robots: A geometric perspective for users. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 26(1):41–55, 2002.
- R. Horaud and F. Dornaika. Hand-eye calibration. *The international journal of robotics research*, 14(3):195–210, 1995. URL <http://ijr.sagepub.com/content/14/3/195.short>.
- ISO. ISO 8373:2012 Robots and robotic devices – vocabulary, 2012.
- KA. Raufoss ABC-System Manual, 2013. Fra interne kilder.
- KA. Raufoss ABC-System Product Catalogue. [http://www.kongsbergautomotive.com/globalassets/productsservices/after-market/catalogues-and-flyers/raufoss\\_couplings\\_catalogue\\_2016\\_web.pdf](http://www.kongsbergautomotive.com/globalassets/productsservices/after-market/catalogues-and-flyers/raufoss_couplings_catalogue_2016_web.pdf), 2016a. (Accessed on 01/24/2017).
- KA. Raufoss ABC KArtridge Manual, 2016b.
- A. Kadambi, A. Bhandari, and R. Raskar. 3d Depth Cameras in Vision: Benefits and Limitations of the Hardware. In L. Shao, J. Han, P. Kohli, and Z. Zhang, editors, *Computer Vision and Machine Learning with RGB-D Sensors*, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition, pages 3–26. Springer International Publishing, 2014. ISBN 978-3-319-08650-7 978-3-319-08651-4. URL [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08651-4\\_1](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-08651-4_1). DOI: 10.1007/978-3-319-08651-4\_1.

- O. Khatib. CS223A - introduction to robotics - stanford. <http://cs.stanford.edu/groups/manips/teaching/cs223a/>, 2017. (Accessed on 03/23/2017).
- A. Koestler. *The ghost in the machine*. Macmillan, New York, 1967.
- Y. Koren. *Wiley Series in Systems Engineering and Management : Global Manufacturing Revolution : Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems (1)*. Wiley, Hoboken, US, 2010. ISBN 978-0-470-61879-0. URL <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10388310>.
- H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4):239–242, 2014. ISSN 1867-0202. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>.
- E. H. v. Leeuwen and D. Norrie. Holons and holarchies [intelligent manufacturing systems]. *Manufacturing Engineer*, 76(2):86–88, Apr. 1997. ISSN 0956-9944. doi: 10.1049/me:19970203.
- T. K. . Lien. *Robotmontasje i små serier*. Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim, 2000. ISBN 978-82-7706-146-7. URL [http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb\\_digibok\\_2009071401018](http://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2009071401018).
- LMI Technologies. Structured light vs. laser triangulation for 3d scanning and inspection | lmi technologies. <http://lmi3d.com/blog/structured-light-vs-laser-triangulation-3d-scanning-and-inspection>, 2015. (Accessed on 02/20/2017).
- B.-B. Mathieu. What does collaborative robot mean ? <http://blog.robotiq.com/what-does-collaborative-robot-mean>, 2015. (Accessed on 03/23/2017).
- MF Automation. Innen- & aussengreifer | mf automation gmbh. <http://www.mf-automation.com/innen-aussengreifer/>, 2017. (Accessed on 04/02/2017).
- G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann, and H. Schunk. *Robot Grippers*. John Wiley & Sons, Feb. 2007. ISBN 978-3-527-60989-5. Google-Books-ID: mJyOOe2ohq8C.
- MVTec. halcon-12.0-solution-guide-iii-c-3d-vision.pdf, 2015. URL <http://download.mvtec.com/halcon-12.0-solution-guide-iii-c-3d-vision.pdf>.
- Niklas Modig and Pär Åhlström. *Detta er Lean*. Sept. 2014. ISBN 978-91-87791-04-8. URL <http://www.adlibris.com/no/e-bok/detta-er-lean-9789187791048>.
- Ohrmann. Ohrmann montageteknik | anlagen zur zuführung und montage von dichtungen und o-ringen | außenmontage. <http://www.ohrmann.de/de/produkte/halbautomaten/aussenmontage/aussenmontage.html>, 2017. (Accessed on 04/27/2017).

- D. L. Parnas. On the Criteria to Be Used in Decomposing Systems into Modules. *Commun. ACM*, 15(12):1053–1058, Dec. 1972. ISSN 0001-0782. doi: 10.1145/361598.361623. URL <http://doi.acm.org/10.1145/361598.361623>.
- R. D. Quinn, G. C. Causey, F. L. Merat, D. M. Sargent, N. A. Barendt, W. S. Newman, V. B. Velasco, A. Podgurski, J.-Y. Jo, L. S. Sterling, and Y. Kim. An agile manufacturing workcell design. *IIE Transactions*, 29(10):901–909, Oct. 1997. ISSN 0740-817X, 1545-8830. doi: 10.1080/07408179708966410. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07408179708966410>.
- RIA. Robotics Industry Insights - Robotic Bin Picking. [http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robotic-Bin-Picking-The-Holy-Grail-in-Sight/content\\_id/6002](http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robotic-Bin-Picking-The-Holy-Grail-in-Sight/content_id/6002), 2016. (Accessed on 03/14/2017).
- RIA and B. Bennet. Robotics Industry Insights - Get a Grip: Choosing a Gripper. [https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Get-a-Grip-Choosing-a-Gripper-for-your-Robotic-Application/content\\_id/1162](https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Get-a-Grip-Choosing-a-Gripper-for-your-Robotic-Application/content_id/1162), 2001. (Accessed on 05/14/2017).
- RIA and B. Bennet. Robotic industries association - robot design, integrated controls and software architectures of industrial robots. [http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robot-Design-Integrated-Controls-and-Software-Architectures-of-Industrial-Robots/content\\_id/3909](http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/Robot-Design-Integrated-Controls-and-Software-Architectures-of-Industrial-Robots/content_id/3909), 2013. (Accessed on 03/23/2017).
- Robot Worx. The future of automated random bin picking. <https://www.robots.com/blog/viewing/the-future-of-automated-random-bin-picking>, 2017. (Accessed on 03/14/2017).
- M. Rolfsen. *Lean blir norsk (Lean i den norske samarbeidsmodellen)* |. 2014. ISBN 978-82-450-1600-0. URL <http://www.fagbokforlaget.no/Lean-blir-norsk/I9788245016000>.
- K. Rosvold, A. homesourcing – Store norske leksikon. <https://snl.no/homesourcing>, 2016. (Accessed on 03/24/2017).
- O. Roulet-Dubonnet and P. Ystgaard. An Application of the Holonic Manufacturing System to a Flexible Assembly Cell. In *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*, pages 29–38. Springer, Berlin, Heidelberg, Aug. 2011. doi: 10.1007/978-3-642-23181-0\_3. URL [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23181-0\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-23181-0_3).
- A. Tanya, M. Robotics industry insights - collaborative robots. <http://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Industry-Insights/>

- [Collaborative-Robots-and-Safety-Hand-in-Hand/content\\_id/6198](#), 2016. (Accessed on 03/23/2017).
- Toyota. Toyota Global Site | Production System, 2017. URL [http://www.toyota-global.com/company/vision\\_philosophy/toyota\\_production\\_system/index.html](http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system/index.html).
- TU. Norske bedrifter flytter produksjon hjem fra Kina - tilfeldig eller en trend? <https://www.tu.no/artikler/norske-bedrifter-flytter-produksjon-hjem-fra-kina-tilfeldig-eller-en-trend/347425>, 2016a. (Accessed on 02/18/2017).
- TU. Ny trend: Norske bedrifter flytter hjem produksjonen fra lavkostland, 2016b. URL <https://www.tu.no/artikler/ny-trend-norske-bedrifter-flytter-hjem-produksjonen-fra-lavkostland/348711>. (Accessed on 02/18/2017).
- TU. Verdens raskeste og mest nøyaktige 3D-kamera er utviklet i Norge. <https://www.tu.no/artikler/vedens-raskeste-og-mest-noyaktige-3d-kamera-er-utviklet-i-norge/363397>, 2016c. (Accessed on 02/20/2017).
- D. Vernon. *Machine Vision: Automated Visual Inspection and Robot Vision*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1991. ISBN 0-13-543398-3.
- H. P. Wiendahl, H. A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M. F. Zäh, H. H. Wiendahl, N. Duffie, and M. Brieke. Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2):783–809, Jan. 2007. ISSN 0007-8506. doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607001552>.
- Wikipedia. 3d scanner - wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/3D\\_scanner#Triangulation](https://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner#Triangulation), 2017a. (Accessed on 02/20/2017).
- Wikipedia. Camera — wikipedia, the free encyclopedia, 2017b. URL <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Camera&oldid=765240059>. [Online; accessed 15-February-2017].
- Wikipedia. Singularity (mathematics) — wikipedia, the free encyclopedia, 2017c. URL [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Singularity\\_\(mathematics\)&oldid=766116088](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Singularity_(mathematics)&oldid=766116088). [Online; accessed 3-April-2017].
- H. William. CSCI 512/EENG 512 Computer Vision, Feb. 2017. URL <http://inside.mines.edu/~whoff/courses/EENG512/>.

J. Womack and D. Jones. *Lean Thinking: Banish Waste And Create Wealth In Your Corporation*. Simon & Schuster UK, 2013. ISBN 978-1-4711-1100-6. URL <https://books.google.no/books?id=QZrZAAAQBAJ>.

# Vedlegg A

## Kildekode

Et utvalg av koden benyttet i den praktiske testingen ligger presentert i dette vedlegget. For komplett oversikt er alle scriptene som ble benyttet i den praktiske testingen er koden lagt ved som digitalt vedlegg i vedlegg C.

### A.1 Lokalisering

Koden benyttet for å generere bildet i figur 7.5 er skrevet av Olivier Roulet-Dubonnet. Koden henter inn en .stl-fil og et punktskybilde som input. Halconoperatoren «find\_surface\_model» sørger for lokaliseringen.

```
1 import sys
  sys.path.insert(0, "../")
3 import numpy as np
  import hcn
5 from IPython import embed

7 import vtk_visualizer as vv

9 if __name__ == "__main__":
    if len(sys.argv) < 2:
11         print("usage: program part_number")
            sys.exit(1)
13     nb = sys.argv[1]
        cad_path = "CAD/KA{}.STL".format(nb)
15     scene_path = "punktskyer/scene_ka{}_simple.ply".format(nb)

17     # first read CAD model
        mod = hcn.Model3D.from_file(cad_path, "mm")
19     #mod = mod.compute_normals(80, 2)
        mod = mod.sampled("fast_compute_normals", 0.001)
21     s = mod.create_surface_model(0.001, invert_normals="true")
        print("SURF READY")

23
```

```

#now read our scene
25 scene = hcn.Model3D.from_file(scene_path, "m")
#scene = scene.sampled("fast", 0.001)
27 scene = scene.compute_normals(60, 2)
#scene = scene.sampled("fast", 0.002)
29 print("SCENE READY")

31 poses, score = s.find_surface_model(scene, 0.001, 0.2, min_score=0, params={"
num_matches":1})
print("Found ", len(score), "matches: ", poses)
33 if len(poses) > 0:
    tr = mod.transformed(poses[0])
35 transformed = [mod.transformed(pose) for pose in poses]
    arrays = [mod.to_array() for mod in transformed]
37 #scene_full = hcn.Model3D.from_file("punktskyer/ka1.ply", "mm")
    arrays.insert(0, scene.to_array())

39
    vv.plotxyz(arrays, block=True)

41
#m = m.select_x(0, 1)
43 #m = m.select_y(0, 1)
#m = m.select_z(0.01, 1)
45 embed()

```

## A.2 Hovedprogram

Hovedprogrammet ble benyttet for å kjøre selve sekvensen som tar bilde av arbeidsområdet, lokaliserer og griper koblingen. I tillegg ble det benyttet fem andre skript som definerte funksjoner for å styre blant annet kamera, robot og kommunikasjon med Halcon. Biblioteket benyttet for å kontrollere UR-roboten er tilgjengelig på <https://github.com/SintefRaufossManufacturing/python-urx>.

```

1 from math import pi
import math3d as m3d
3 import config as cfg
from IPython import embed

5
class Main(object):
7     def __init__(self, cam, rob):
        self.cam = cam
9         self.rob = rob

11     def calculate_grasp_pose_2d(self, pose):
        """
13         Calculate grasp pose from pose

15         In pose:

```



```

17         Y axis is axis of symmetry of component
           X axis and Z axis have random directions

19     Purpose of method:
           Using Y as a desired axis for grasping,
21         method finds the grasp Z axis that is orthogonal to Y,
           and closest to global Z axis

23         Return grasp pose parallel to robot csys (table)
25     """
           # Y AXIS is the part's symmetry axis
27         # We want to obtain an orthogonal vector to the Y axis
           # orth: dot product is equal to 0

29
           object_y_vec_hcn = m3d.Vector(pose.orient[1]) #input from Halcon
31         global_z_vec = m3d.Vector(cfg.robot_csys.orient[2])

33         object_x_vec = object_y_vec_hcn.cross(global_z_vec) #cross product
           object_y_vec = global_z_vec.cross(object_x_vec) #cross product

35
           pose.orient = m3d.Orientation(object_x_vec, object_y_vec, global_z_vec) #
new pose
37         return pose

39     def run(self):
           """
41         The main program

43         """
           self.rob.home(vel=0.9) #home position

45
           # Get pointcloud scene in base coordinates
47         cloud_arr = self.cam.get_pc_in_base()
           # Convert pointcloud format from numpy array to pcl object
49         cloud_pcl = self.cam.array2pcl(cloud_arr)

51         # Filter table from point cloud
           filt_cloud = self.cam.region_pc(cloud_pcl)

53
           result = self.cam.detect_object(filt_cloud.to_array())
55         pose = result[1][0]

57         #Calculate orientation of gripper for gripping workpiece
           self.calculate_grasp_pose_2d(pose)

59
           #Open gripper
61         self.rob.release()

```

```

63     # Adjust z coordinate for gripping position
pose.pos[2] = -0.087

65

66     #Move down to grip workpiece
67     input('PRESS ENTER TO MOVE DOWN')
self.rob.set_pose(pose, vel=0.01, acc=0.01)

69

70     input('PRESS ENTER TO GRIP')
71     self.rob.grip()

72

73     input('PRESS ENTER TO MOVE UP')
pose.pos[2] = 0

75

76     self.rob.set_pose(pose, vel=0.09, acc=0.09)
77

78

79     #Move towards fixture for control of accuracy
ny_pose = m3d.Transform([ 6.30190251e-01, 2.28933529e-01,1.23587659e
-01,-3.17675232e-05, 6.37636923e-05, -3.04893790e+00])
81     self.rob.set_pose(ny_pose, vel=0.09, acc=0.09)

82

83     #Move to touch fixture for control of accuracy
ny_pose = m3d.Transform([6.30233199e-01, 3.01310065e-01, 1.23574522e-01,
-8.55932116e-05, 5.68800357e-06, -3.04897633e+00])
85     self.rob.set_pose(ny_pose, vel=0.02, acc=0.02)

86

87     #Move away from fixture
ny_pose = m3d.Transform([ 6.30190251e-01, 2.28933529e-01, 1.23587659e
-01, -3.17675232e-05, 6.37636923e-05, -3.04893790e+00])
89     self.rob.set_pose(ny_pose, vel=0.02, acc=0.02)

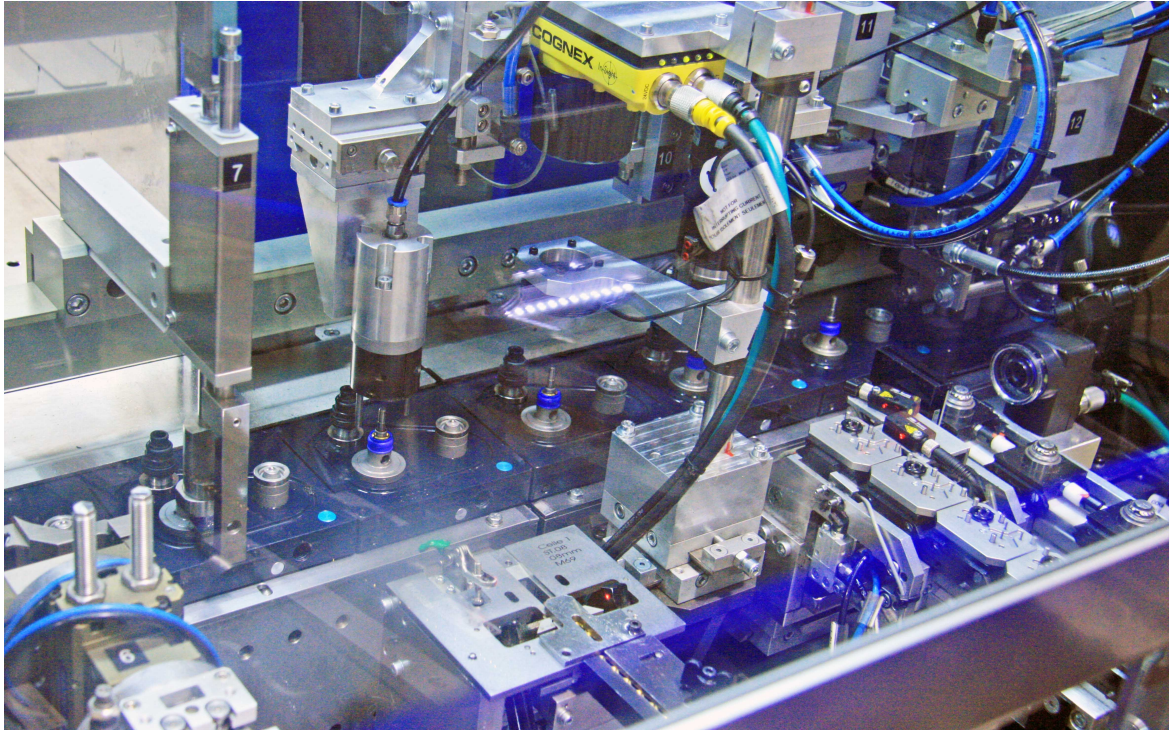
```

# **Vedlegg B**

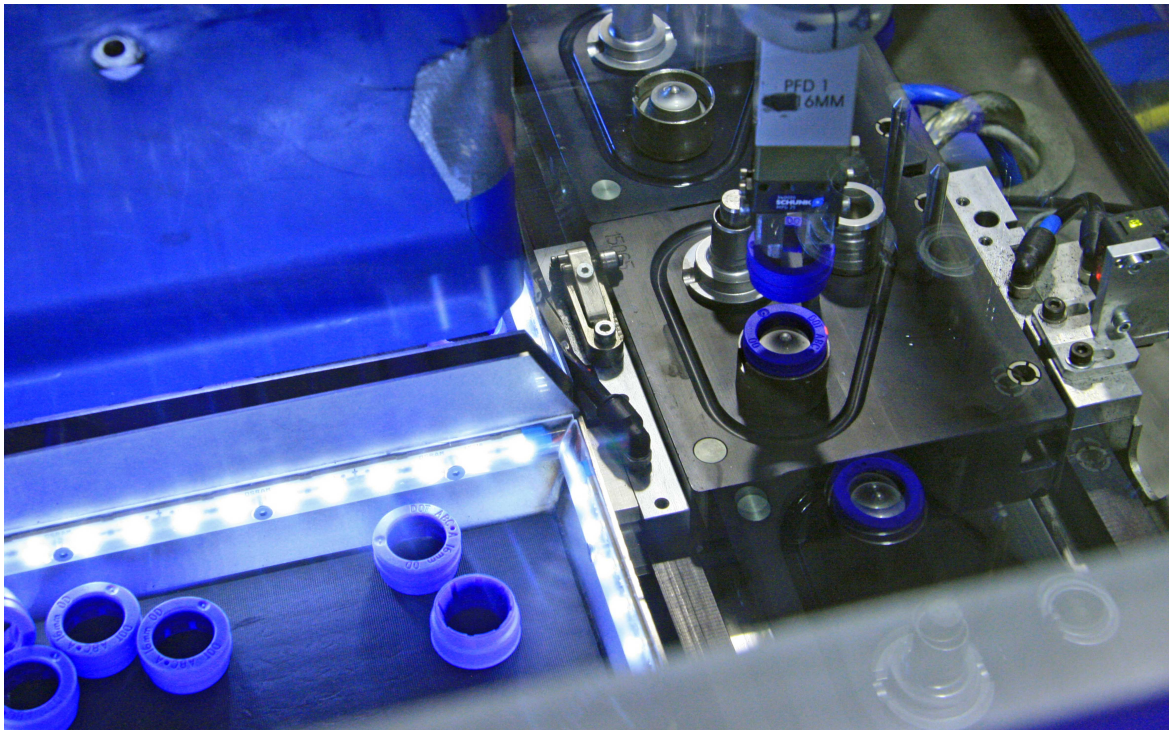
## **Diverse**

### **B.1 Supplerende illustrasjoner**

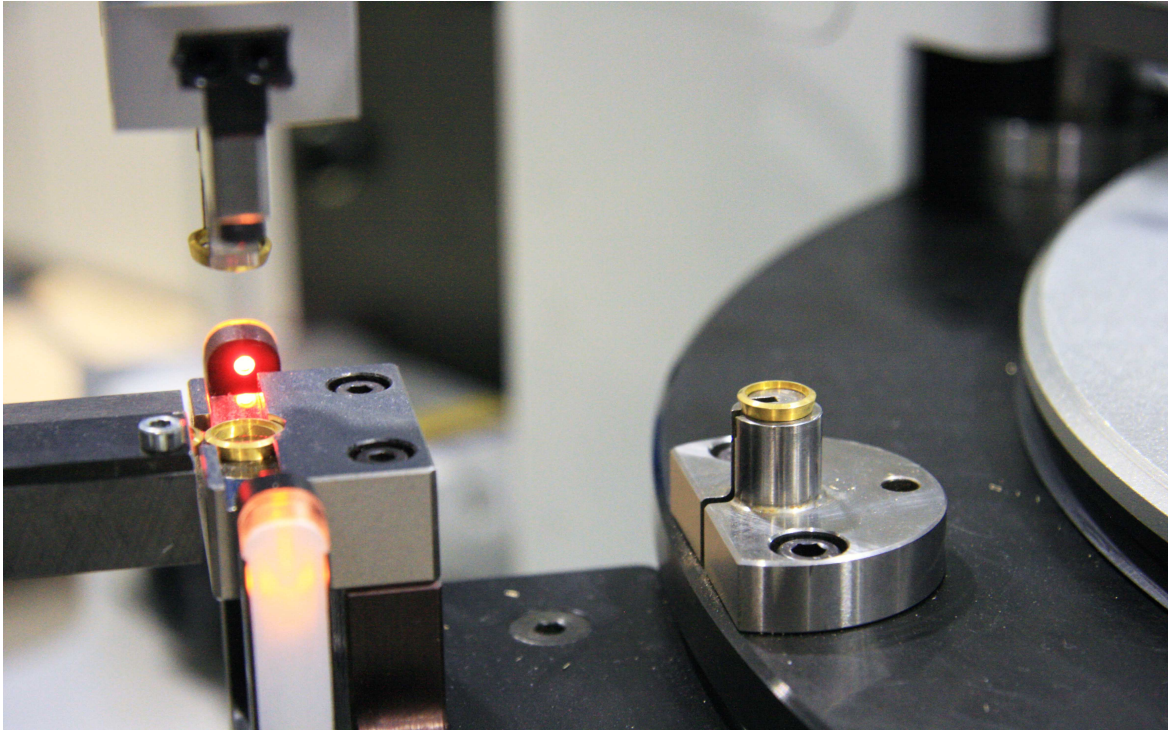
Det er vedlagt et utvalg bilder fra KA sin automatiserte montasje for å kunne øke forståelsen av systemet.



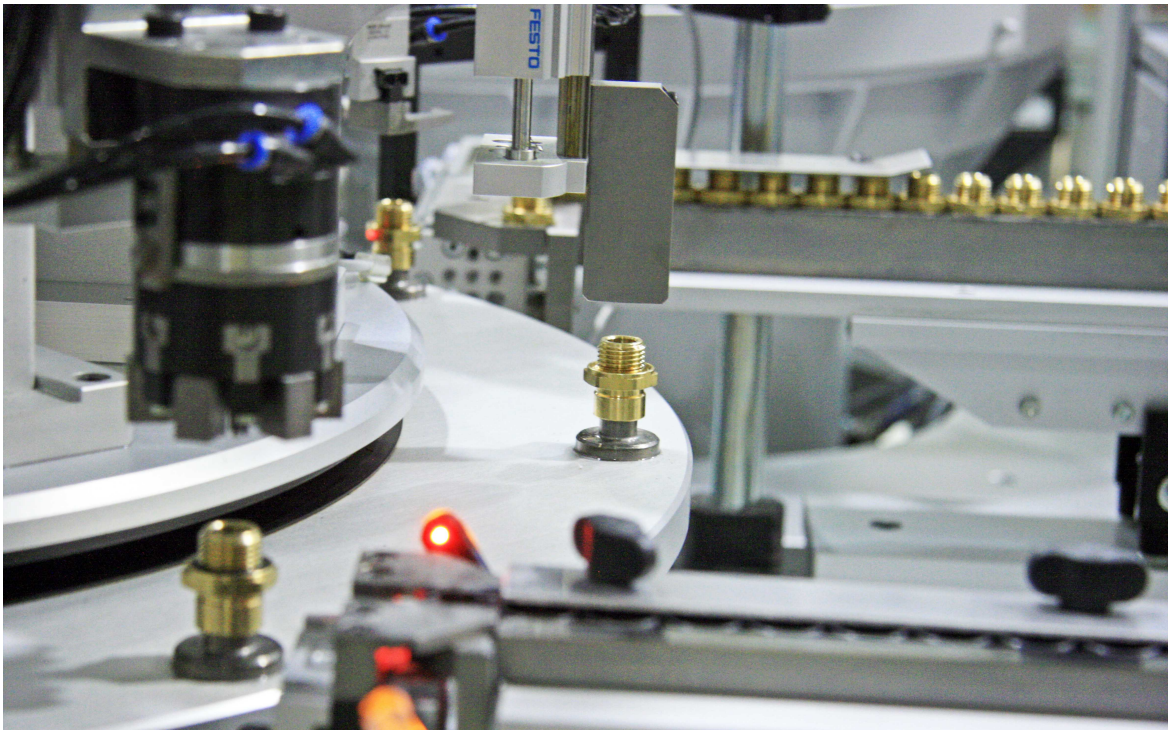
Figur B.1: Montasje av ABC KArtridge i en Mikron-automat



Figur B.2: Griping av conelementer i en Mikron-automat



Figur B.3: Griping av en gripering



Figur B.4: Rundbordmontasje av ytre o-ringer

## B.2 Ulike montasjesteg

KA sine montasjeprosesser kan deles inn i følgende ulike montasjesteg: push-in, swiveler, KArtridge portside, og muttere og ytre o-ringer på bulkhead.

### Montasje av push-in siden

KA lager push-in-koblinger for 17 ulike rørtyper: 4x1 mm, 6x1 mm, 8x1 mm, 10x1 mm, 10x1,25 mm, 10x1,5 mm, 12x1,5 mm, 14x2 mm, 15x1,5 mm, 16x2 mm, 18x2 mm, 1/4", 3/8", 1/2", 5/8" og 3/4". Montasje av de ulike variantene inkluderer følgende komponenter:

- 50+ ulike hus (new line, KArtridge, Integral og Threadless)
- 17 ulike støtterør (avhenger av rørtykkelse)
- 15 ulike hovedtetninger
- 15 ulike miljøtetninger
- 15 ulike griperinger (avhenger av rørdimensjon)
- 15 ulike coneelementer med miljøtetning (avhenger av rørdimensjon)
- Silikon

### Montasje av KArtridge portside

KArtridge har et utvalg ulike koblingshus med tre ulike standard portstørrelser. Det medfører følgende utvalg komponenter i ulik størrelse:

- 15+ ulike hus (KArtridge, plug, reducer etc)
- 3 ulike hovedtetninger
- 3 ulike miljøtetninger
- 6 ulike støtterør
- 3 ulike låseringer
- 3 ulike star washere
- 3 ulike beskyttelseshetter
- Silikon

### **Montasje av swiveler**

Både threadless- og swivelkoblinger har tre ulike portstørrelser. Montasjen inkluderer følgende komponenter:

- 50+ ulike hus
- 3 ulike miljøtetninger
- 3 ulike hovedtetninger
- 3 ulike beskyttelseshetter
- Silikon

### **Montasje av muttere og ytre o-ringer på bulkhead osv**

KA leverer i hovedsak størrelsene M10, M12, M14, M16, M22 og M26; men kundespesifikke koblinger fører til et uvisst antall ulike kombinasjoner. I tillegg kommer produksjonen av inch-størrelser til å øke.

- 6+ Muttere i M10 – M26 størrelse og et utvalg i inch
- 6+ ulike o-ringer
- Silikon

### B.3 Produkter som monteres manuelt med swiveler

Dette er et utvalg produkter med en eller flere swiveler som i dag monteres manuelt internt hos KA, eller utkontrakteres til Polen eller ATS. Månedlig volum er grove estimater gjort av Mona Haugnes.

Tabell B.1: Oversikt over ulike produkter som monteres manuelt hos KA i dag

Produkt	Art. nr.	Produksjonssted	Månedlig volum	Portstørrelse
Threadless Swivel Plug	962 40 000	ATS	7000	small
Threadless Swivel Plug	962 50 000	-	3000	regular
Threadless Swivel Plug	962 60 000	KA	500	heavy duty
Union Male	4 ulike art. nr.	Polen	35 000	alle kombinasjoner
Reducer	961 50 106	ATS	10 000	heavy duty
Swivel with Internal Threads	931 50 149	KA	-	regular
Swivel with Internal Threads	931 50 160	ATS	-	regular
Threadless Push-in Coupling	902 04 004	KA	500	small
Threadless Push-in Coupling	902 04 005	KA	-	regular
Threadless Push-in Coupling	902 08 005	-	5000	regular
Double Swivel Bulkhead	933 52 205	ATS	4000	regular + heavy duty
	933 62 206			
Swivel Bulkhead	933 52 216	ATS	1000	regular
	933 52 222			
Swivel Bulkhead	4 ulike art. nr.	ATS + KA	-	regular + heavy duty
Swivel Bulkhead	933 62 228	ATS	-	heavy duty



## B.4 Datablader

### Schunk KGG 80-30

#### Technical data

Description		KGG 80-30	KGG 80-60
ID		0303060	0303061
Stroke per jaw	[mm]	15	30
Closing- / opening force	[N]	130/165	130/165
Weight	[kg]	0.25	0.33
Recommended workpiece weight	[kg]	0.66	0.66
Fluid consumption per double stroke	[cm <sup>3</sup> ]	12	24
min. / max. operating pressure	[bar]	2.5/8	2.5/8
Nominal operating pressure	[bar]	6	6
Closing- / opening time	[s]	0.05/0.05	0.08/0.07
max. permitted finger length	[mm]	80	80
max. permitted weight per finger	[kg]	0.15	0.15
IP class		40	40
min. / max. ambient temperature	[°C]	5/90	5/90
Repeat accuracy	[mm]	0.02	0.02

- ① Requirements on the levelness of the bolting surface (in relation to the entire bolting surface for the gripper):
- < 0.02 mm with an edge length of up to 100 mm
  - < 0.05 mm with an edge length of 100 mm or longer

Figur B.5: Datablad for Schunk KGG 80-30

### Fanuc LR Mate 200iD

# LR Mate 200iD



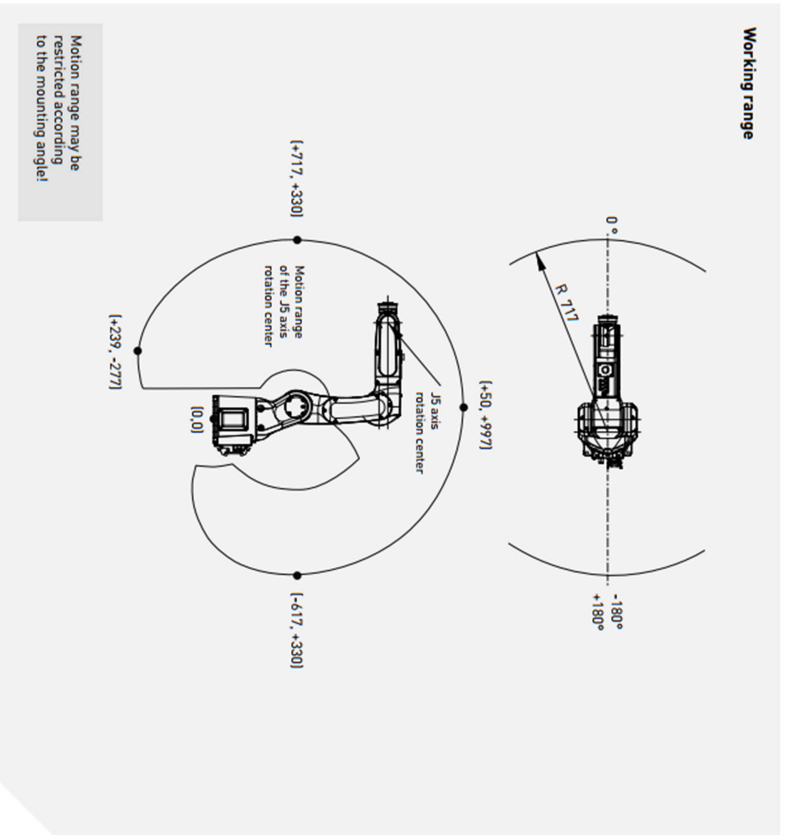
Max. load capacity  
at wrist: **7 kg**



Max. reach:  
**717 mm**

Controlled axes	Repeatability (mm)	Mechanical weight (kg)	Motion range [°]						Maximum speed [°/s]						J4 Moment/ Inertia (Nm/kgm <sup>2</sup> )	J5 Moment/ Inertia (Nm/kgm <sup>2</sup> )	J6 Moment/ Inertia (Nm/kgm <sup>2</sup> )		
			J1	J2	J3	J4	J5	J6	E1	J1	J2	J3	J4	J5				J6	E1
6	± 0.018*	25	360	245	420	380	250	720	-	450	380	520	550	545	1000	-	16.6/0.47	16.6/0.47	9.4/0.15

## Working range



Motion range may be restricted according to the mounting angle!

MDS-00007-EN

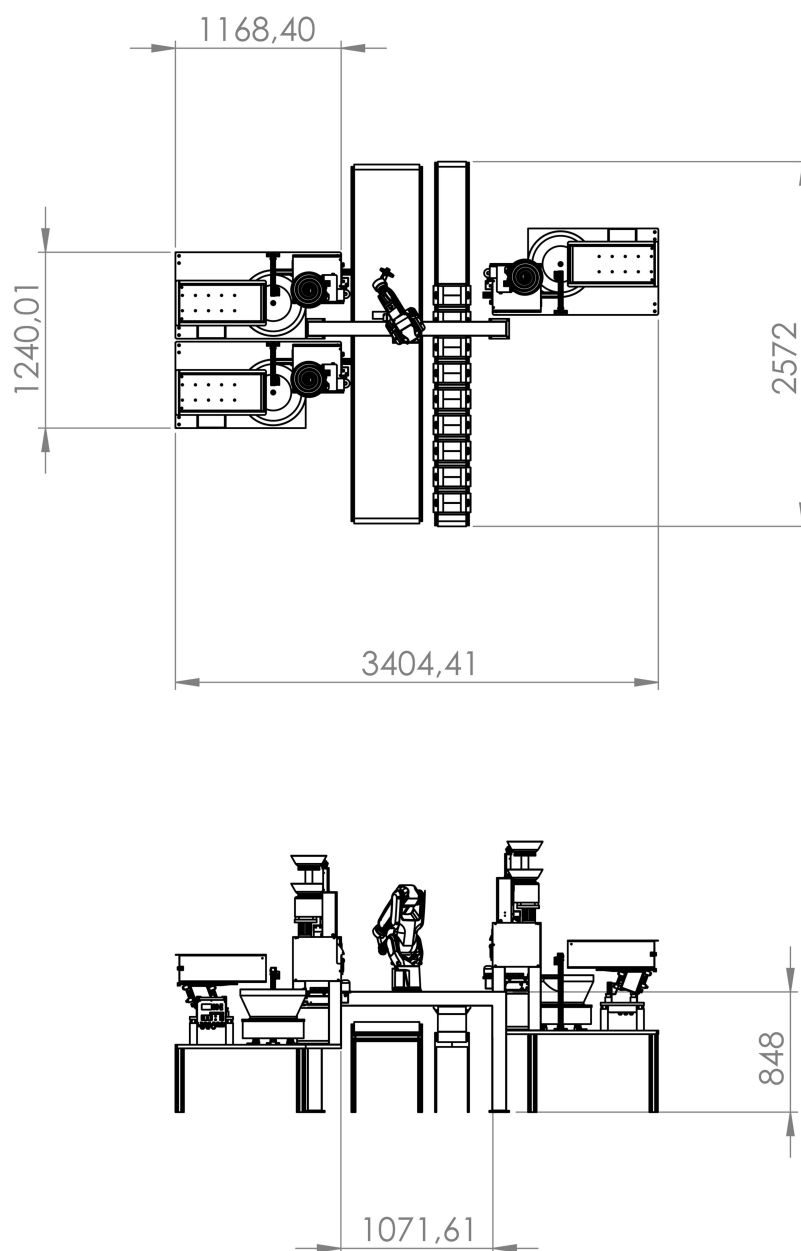
Figur B.6: Datablad for Fannuc sin LR Mate 200iD. Hentet fra <http://www.fanuc.eu/si/en>

<b>Robot</b>	LR Mate 200iD
Robot footprint (mm)	190 x 190
Mounting position Floor	•
Mounting position Upside down	•
Mounting position Angle	•
<b>Controller</b>	R30iB
Open air cabinet	○
Mate cabinet	•
A-cabinet	-
B-cabinet	-
iPendant Touch	•
<b>Electrical connections</b>	
Voltage 50/60Hz 3phase [V]	200-230
Voltage 50/60Hz 1phase [V]	0.5
Average power consumption [kW]	6/2
<b>Integrated services</b>	
Integrated signals on upper arm In/Out	1
Integrated air supply	-
<b>Environment</b>	
Acoustic noise level [dB]	64.7
Ambient temperature [° C]	0-45
<b>Protection</b>	
Body standard/optional	IP67/IP69K
Wrist & J3 arm standard/optional	IP67/IP69K
Clean room (ISO Class 4)	-

• standard ○ on request - not available ( ) with hardware and/or software option

\*Based on ISO7283

## B.5 Dimensjoner montasjecelle for swiveler



Figur B.7: Dimensjoner i [mm]. Montasjecelle for swiveler



# Vedlegg C

## Digitale vedlegg

Filen *DigitaleVedlegg\_masterPeterSjolie.zip* er vedlagt som digitalt vedlegg. Filen inneholder følgende:

- En mappe med CAD-modeller av den ferdig griperen. Tilgjengelig både i filformatet .step og .pdf
- En mappe med CAD-modeller av designet utviklet i kapittel 5.5. Tilgjengelig i filformatet .step
- En mappe med simuleringer fra Visual Components. Tilgjengelig både i videoforformatet .mp4 og .pdf
- En mappe med en video fra produksjonen av griperfingrene i rustfritt stål
- En mappe med punktskybilder av ulike koblingshus tatt med Zivid-kameraet. I bildene er omgivelse filtrert bort for å redusere filstørrelsen. Bildene er i formatet .ply, og kan eksempelvis åpnes med gratisprogrammet CloudCompare
- En mappe med videoer fra den praktiske testingen
- En mappe med kildekoden benyttet i den praktiske testingen