



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:
Informasjonsteknologi - Automatisering og
signalbehandling

Vårsemesteret, 2018

Konfidensiell

Forfatter:
Kjetil Øvrebø

(signatur forfatter)

Fagansvarlig:
Karl Skretting

Veileder(e):
Karl Skretting, Jean-Marc Launay

Tittel på masteroppgaven:
Robotløsning for håndtering av pølser på røykespyd

Engelsk tittel:
Robotic solution for handling sausages on smoke rods

Studiepoeng:
30

Emneord:
Robot
Kollaborativ
Automatisering
Pølse
Røykespyd
RobotNorge AS

Sidetall:
41
+ vedlegg/annet:
1 og .7z-fil

Stavanger, 15.06.2018

Robotløsning for håndtering av pølser på røykespyd



Kjetil Øvrebø

Det teknisk-naturvitenskapelige fakultet
Institutt for data- og elektroteknologi
Universitetet i Stavanger

Mastergradsavhandling
Automatisering og signalbehandling

Juni 2018

Sammendrag

Industrielle roboter har i lang tid blitt plassert i et fysisk avgrenset og inngjerdet område for arbeidernes sikkerhet. Med nyvinninger innen sikkerhetssystemer og oppdaterte regelverk er dette i ferd med å endres. Kollaborative industrielle roboter gjør det mulig å kombinere de repetitive egenskapene til en robot med en arbeiders evne til å oppdage feil og utføre individuell tilpasning.

Målet for denne avhandlingen er å utvikle en kollaborativ robotisert løsning som trer pølser på røykespyd, hekter dem av en opphengsmaskin og plasserer dem i tilhørende røykevogn. For å nå dette målet er det laget forslag til planløsning, robotverktøy og nødvendig tilleggsutstyr. Kode for bevegelser av roboten er utviklet, med nødvendige begrensninger i fart og akselerasjon. Ulike metoder for å tilfredsstille krav til sikkerhet er undersøkt og beregnet. To forslag til løsning er visualisert, simulert og testet i robotprodusentens dataprogram, med alle bevegelser og nødvendige sikkerhetstiltak.

Resultatene fra simuleringen er lovende, det skal være mulig å implementere en kollaborativ robotisert løsning med gjennomsnittlig syklustid 14,43 s, hvilket er innenfor kravet på 15,46 s gitt av oppdragsgiveren. En alternativ konvensjonell løsning er utarbeidet for sammenlikning, denne oppnår resultater tilsvarende et kommersielt robotisert produkt med $\frac{1}{6}$ av dens arealbruk. Et grovt prisoverslag viser at forslagene til løsning har inntjeningstid på hhv. 20 og 17 måneder.

Forord

Jeg vil gjerne benytte denne siden til å rette en takk til alle dem som har hjulpet meg gjennom arbeidet med denne avhandlingen.

Først vil jeg få takke min veileder ved Universitetet i Stavanger, Karl Skretting, for tilrettelegging av oppgaven, god støtte og oppfølging.

Tusen takk til ledelsen ved RobotNorge for utforming av oppgaven, lån av kontorplass og nødvendig materiell. Takk til min veileder Jean-Marc Launay for alle innspill, positive og konstruktive tilbakemeldinger og alle produktive kaffemøter. Takk til Rune, Svein Morten, Sigmund, Ove og alle andre for all hjelp fra introduksjonskurs til Rapid-kode. Takk til Mette for fantastisk lunsj og velfylt kaffehyller.

Takk til Olav og hans team med dyktige og hjelpsomme teknikere. Takk for at du la grunnlaget for oppgaven, kom med tips til forbedringer underveis og skaffet til veie nødvendig dokumentasjon og kontakt med ressurspersoner i bransjen.

Sist men ikke minst, hjertelig takk til min partner, familie og venner for all støtte under arbeidet med avhandlingen.

Innhold

Sammendrag	iii
Forord	iv
Innhold	v
1 Innledning	1
1.1 Motivasjon	1
1.2 Målsetning	2
1.3 Relatert arbeid	2
1.3.1 Marel iConveyor	2
1.3.2 Handtmann AST 340	3
2 Bakgrunn	4
2.1 Produksjonsutstyr	4
2.1.1 Vakuumfyller	5
2.1.2 Pølsestopper	5
2.1.3 Opphengsmaskin	6
2.1.4 Røykespyd	6
2.1.5 Røykevogn	7
2.1.6 Produksjonsdata	7
2.2 Robot	8
2.3 Standarder	9
2.4 Kollaborativ robot	10
2.4.1 Sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp	11
2.4.2 Håndstyring	11
2.4.3 Hastighet- og avstandsovervåking	12
2.4.4 Effekt- og kraftbegrensning	12
2.5 Sikkerhetssystemer	13
2.5.1 Lysbom og lysgitter	13

2.5.2	Laserscanner	14
2.5.3	3D-kamera	14
2.5.4	Beregning av sikkerhetsavstand	15
2.5.5	Fysiske hindre	16
2.6	RobotStudio®	17
2.7	Autodesk Inventor®	19
2.8	Hygiene	19
3	Implementasjon	20
3.1	Planløsning	20
3.1.1	Utgangspunkt	20
3.1.2	Første utkast	21
3.1.3	Andre utkast	22
3.1.4	Mislykkede forsøk	22
3.1.5	Foreslått planløsning	24
3.2	Verktøy	25
3.3	Magasin for røykespyd	26
3.4	Rondell og ny røykevogn	26
3.5	RobotStudio	28
3.5.1	Modellering	28
3.5.2	Programmering	28
3.5.3	Smart Components	29
3.5.4	Simulering	30
3.5.5	SafeMove	31
3.6	Sikkerhetsavstand	32
4	Tester og resultat	35
4.1	Test av konsept	35
4.2	Test av ikke-kollaborativt løsning	36
5	Diskusjon	37
6	Konklusjon og videre arbeid	39
	Bibliografi	40
A	Vedlegg	42

1 Innledning

1.1 Motivasjon

En av regionens ledende næringsmiddelaktører foredler kjøttprodukter i stor skala, og produserer blant annet pølser i ulike kategorier. Produsenten benytter moderne maskiner for tilvirkning av pølser, med manuelle operasjoner i deler av prosessen. Personellet trer i dag røykespyd manuelt inn i løkker av pølser, hekter dem av opphengsmaskinen og plasserer dem i røykevogn for videre prosessering. Dette er en ensformig oppgave med høy intensitet som kan fremprovosere belastningsskader.

Bedriften ønsker å få undersøkt muligheten for å robotisere denne delen av prosessen, tilpasset sin produksjon og fremtidige utskiftninger av produksjonsmateriell. Grunnet lokalets utforming, begrensede areal og av hygieniske årsaker forutsettes det at roboten er helt eller delvis kollaborerende, dette for å unngå fysiske barrierer som innskrenker operatørens arbeidsområde og opptar verdifullt areal i produksjonslokalet.

Problemstillingen for denne mastergradsavhandlingen er utarbeidet av næringsmiddelaktøren i samarbeid med RobotNorge AS, landets ledende robotiseringsselskap, og eneforhandler i Norge av ABBs totale robotprogram.[5] Formålet med oppgaven å forbedre arbeidsmiljøet for personellet, heretter kalt operatører, samt legge til rette for et høyere produksjonsvolum.

Navnet robot kommer fra det tsjekkiske ordet for arbeid - *robot*, og ble først benyttet i et skuespill av Karel Capek i 1920[25, kap.1]. Navnet er siden blitt benyttet på flere former for mekaniske innretninger fra selvkjørende undervannsfarkoster og kjøretøy på andre planeter til støvsugere og plenklippere. Denne avhandlingen vil derimot bruke benevnningen roboter om datastyrt manipulatorer, primært beregnet for industrielt bruk.

1.2 Målsetning

Målet for avhandlingen er å utvikle en robotløsning som trer røykespyd inn i løkker av pølser hengende på en opphengsmaskin, hekter disse av og plasserer dem i en tilhørende røykevogn for videre prosessering. Løsningen skal kunne håndtere alle typer pølser fra produksjonslinjene, med samme eller kortere syklusid.

Forslaget til løsning skal spesifisere hvilken robotmodell som bør benyttes, hvilket tilleggsutstyr som kreves og et passende robotverktøy. Det skal utarbeides et sikkerhetssystem med passende sensorer som samsvarer med graden av kollaborering mellom robot og operatør. Forslag til planløsning skal utformes og visualiseres. Løsningen skal testes ved hjelp av simulering i robotprodusentens dataprogram. Forslått løsning kan sees som video ved å følge [denne linken](#).

1.3 Relatert arbeid

1.3.1 Marel iConveyor

Den islandske maskinprodusenten Marel leverer prosessteknologi til fjærfe-, kjøtt- og fiskeindustrien. For bruk sammen med deres egen opphengsmaskin iLinker, er maskinen iConveyor utviklet for å tre pølser på røykespyd og klargjøre dem for henting i forkant av maskinen, vist til høyre i figur 1.1. Ifølge deres brosjyre [19] kan iConveyor opereres av operatør, integreres i et automatisert system eller det kan benyttes en robotisert løsning for forflytning til røykevogn.

Marel leverer ikke en ferdig løsning som fyller røykevogner, iConveyor utgjør dog et godt utgangspunkt ettersom røykespydene er klar for henting i enden av maskinen. Denne løsningen ville vært aktuell for det videre arbeidet med avhandlingen dersom næringsmiddelaktøren ikke hadde investert i nytt produksjonsutstyr fra en annen leverandør.



Figur 1.1. Marel iConveyor[19], maskin for å tre røykespyd i løkker av pølser

1.3.2 Handtmann AST 340

Maskinprodusenten Handtmann GmbH har utviklet en robotisert løsning for å tre røykespyd inn i løkker av pølser, hekte dem av opphengsmaskinen og forflytte dem til røykevogner, se figur 1.2a. Dette systemet er utviklet for deres egen produktportefølje. Ifølge produsentens nettsider [8, 9] innebærer løsningen at forflytningen utføres i en lukket celle med mål 10 x 5,5 m, med vogner plassert i egne sluser. Operatøren åpner slusene utenfor robotcellen for å bytte vogner, og kvitterer på et panel når byttet er utført. Dette sikrer at operatører ikke beveger seg inn i robotens arbeidsområde. Systemet opererer én produksjonslinje, har to vogner tilknyttet cellen, forflytter røykespyd i størrelsen 995 - 1010 mm og har en maksimal kapasitet på 6 røykespyd pr minutt.

Robotens særegne griper ble patentert i 2007[17]. Denne er i prinsippet en konvensjonell griper med tre posisjoner; åpen, delvis åpen og lukket. Formålet med en delvis åpen posisjon er å kunne benytte gravitasjonen til å rotere røykespydet for å sikre at stjerneformede spyd har rett orientering ved plassering i røykevognen. En egen innretning med magasin og arm til å føre ut røykespydet sørger for at løkkene med pølser tres på etterhvert som de beveger seg bortover opphengsmaskinen. Dette kan sees av figur 1.2b. God avstand mellom hvert parti pølser på opphengsmaskinen sørger for at roboten får tid til å hente ferdig fylte røykespyd fra fast lokasjon.

AST 340 er konstruert som en lukket celle på 55 m² hvilket tar for mye plass til at det kan benyttes i lokalet til næringsmiddelaktøren. Arealet kan ikke benyttes til andre formål, og utformingen gjør renhold til en omfattende prosess.



(a) Konstruert som lukket celle[8]



(b) Griper for roboten[30]

Figur 1.2. Handtmann AST 340, robotisert løsning for forflytning av røykespyd

2 Bakgrunn

Denne delen av avhandlingen presenterer de maskiner og utstyr næringsmiddelaktøren benytter i pølseproduksjonen som er del av utviklingen av den robotiserte løsningen, samt produksjonshastighet for utvalgte produkter. Det presenteres nødvendig bakgrunnsinformasjon for roboter generelt og kollaborative roboter spesielt, et utvalg sikkerhetssystemer og de dataverktøy som er benyttet i arbeidet med oppgaven.

2.1 Produksjonsutstyr

Produksjonsutstyret som utdypes i dette delkapittelet begrenser seg til materiellet som befinner seg i umiddelbar nærhet, og i tilknytning til den kommende robotiserte løsningen. Slakting, transport av råvarer, produksjon av pølsemasse og bearbeiding av røe pølser vil ikke bli nærmere utdypet. Næringsmiddelaktøren benytter de samme maskinmodeller som er benyttet for illustrasjon i dette delkapittelet. Figur 2.1 viser en komplett produksjonslinje for stopping og oppheng av pølser.



Figur 2.1. Eksempel på Vemag pøselinje[29]

2.1.1 Vakuumfyller

Vakuumfylleren porsjonerer pølsemassen etter forhåndsinnstilt vekt og leverer denne i en jevn strøm til pølsestopperen, omtalt i kapittel 2.1.2. Pølsemassen blir tilført vakuumfylleren ved hjelp av rørsystemer som leverer direkte i trakten på toppen av maskinen, avbildet øverst i figur 2.2a og ved hjelp av transportvogn. Vognens innhold tømmes i trakten ved hjelp av en løfteanordning påmontert maskinen. Begge former for tilføring av pølsemasse benyttes for å sikre full utnyttelse av produksjonsutstyret. Rørsystemet benyttes for arbeidsskiftets hovedprodukt mens vognene benyttes for mindre partier av pølseprodukter.



(a) Vakuumfyller Vemag HP10E[27]



(b) Pølsestopper Vemag LPG208[28]

Figur 2.2. Vemag produksjonsutstyr

2.1.2 Pølsestopper

Ferdig oppmålte porsjoner med pølsemasse entrer pølsestopperen på dens høyre side, se figur 2.2b. Operatøren klargjør fylling i tarm ved å tre denne på tilegnede fyllerør i maskinen, kunsttarm (plast) for grillpølser og skinnfrie produkter, og naturtarm (svin eller får) for resterende produkter. Pølsemassen entrer fyllerøret, blir omsluttet av tarm, tvinnet, og ført ut av maskinen med et lite tilpasset transportbånd. Optiske sensorer overvåker fylleprosessen og detekterer tarmens ende. Pølsestopperens innebygde kontrollsystem styrer hastigheten til vakuumfylleren beskrevet i kapittel 2.1.1 og opphengsmaskinen beskrevet i kapittel 2.1.3 for å sikre korrekt fylling og oppheng.

2.1.3 Opphengsmaskin

Opphengsmaskinen innretter ferdige lengder med pølser fra pølsestopperen omtalt i kapittel 2.1.2 i løkker på to eller flere pølser. Maskinen består av en rekke justerbare opphengskroker som beveger seg lineært i takt med produksjonshastigheten. Ordinær hastighet er 100 krokker/min, dvs. 40 mm/s. Antall pølser som skal befinne seg i hver løkke, og avstanden disse skal plasseres i på røykespydet avhenger av hvilken type som produseres. Avstanden mellom krokene kan justeres på opphengsmaskinen, mens antall pølser per løkke kan innstilles på pølsestopperen. Krokbandet på forsiden av maskinen, som kan sees av figur 2.3 er montert i en slik høyde at operatøren kan fjerne overskuddsmasse fra pølsene og knytte endene i mest mulig ergonomisk korrekt arbeidsstilling. På den lavere baksiden trer operatøren røykespyd inn i løkkene av pølser før disse hektes av og henges i en røykevogn.



Figur 2.3. Opphengsmaskin Vemag AH212[26]

2.1.4 Røykespyd

Røykespyd benyttes for å henge opp løkker med pølser i en røykevogn. Avhengig av tilknyttet maskineri og type pølser som skal behandles finnes disse i ulike størrelser, og i stjerne- eller rund utgave. Røykespydene som benyttes i denne avhandlingen er 1000 mm lange, 285 g tunge stjerneformede spyd i rustfritt stål med radius 13 mm, se figur 2.4a.

2.1.5 Røykevogn

Råe pølser varmebehandles ved hjelp av damp og røykes før de pakkes klar til forbruker. For å oppnå jevn behandling av alle pølser plasseres røykespydene i spesialtilpasset vogn som vist av figur 2.4b. Avhengig av antall løkker, type og størrelse plasseres spydene 2-6 stk. i høyden og 6-7 i bredden. Hyllene har 20 rom hver for plassering av røykespyd, hvorav hvert rom har en bredde på 35 mm.



(a) Stjerneformede røykespyd

(b) Røykevogn, tegnet i Autodesk Inventor [7]

Figur 2.4. Røykespyd og røykevogn

2.1.6 Produksjonsdata

I tråd med næringsmiddelaktørens ønske vil bare et lite utvalg av produksjonsdataene presenteres i denne avhandlingen. Verdiene som er interessante for utviklingen av den robotiserte løsningen er grenseverdier for syklustid og tyngden til lasten som skal forflyttes. Av tabell 2.1 kan det leses at den tyngste lasten som kan forventes er 11,185 kg og at produksjonshastigheten til det raskeste produktet er 15,46 sekunder. Produksjonsdataene er beregnet fra reelle tall innhentet fra skiftleder i produksjonsavdelingen.

Tabell 2.1. Produksjonsdata

Pølsetype	Totalvekt [kg]	Hastighet [s]
Wiener	3,165	15,95
Røkt kjøttpølse	5,437	15,46
Grill liten	7,585	16,43
Grill middels	10,085	22,05
Grill stor	11,185	24,53

2.2 Robot

En robot har som oftest seks eller flere frihetsgrader, med dette menes at plasseringen av dens ytterste ledd beskrives av seks parametere, hvorav tre er for posisjonering og tre for orientering. Ethvert gitt punkt i dens arbeidsområde kan dermed nåes fra alle tenkelige vinkler. Roboter med flere frihetsgrader har typisk muligheten til å strekke seg rundt andre objekter for å nå et gitt punkt med ønsket orientering.

Den kanskje mest kjente klassen av roboter er den samme som benyttes i denne avhandlingen, *articulated robot* eller RRR-robot. Denne kjennetegnes ved at samtlige ledd er roterende, som gir roboten relativt stor bevegelsesfrihet i et begrenset område.

Ved valg av robotmodell må følgende vilkår oppfylles:

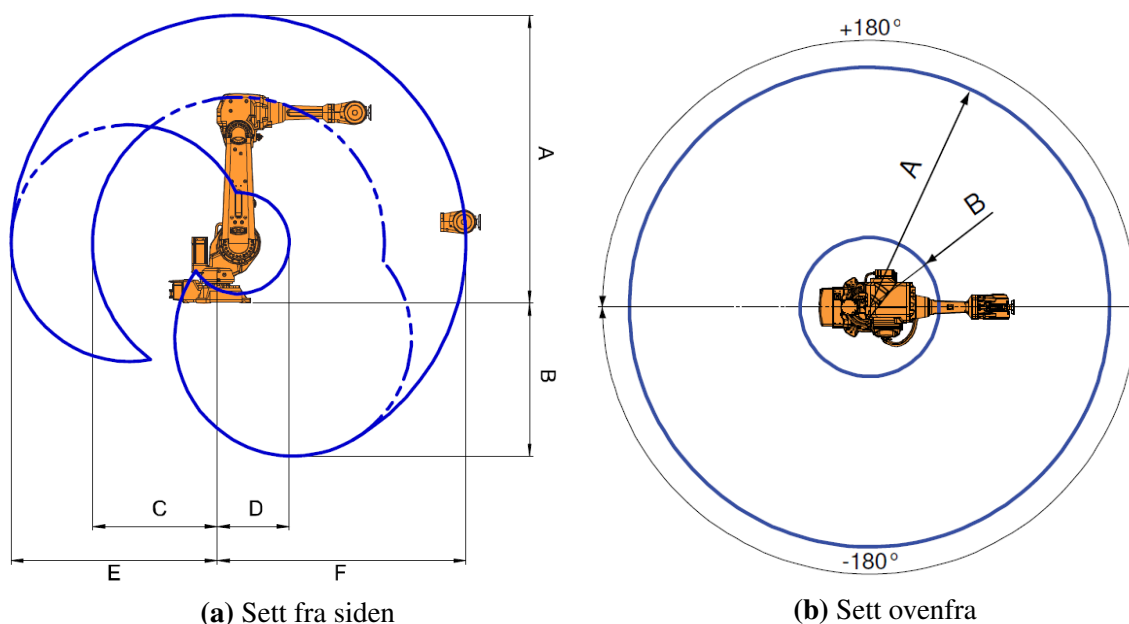
- Roboten må kunne håndtere vekten av griperen og produktene som skal forflyttes.
- Alle punkter for henting og avlevering av pølser skal kunne nåes, og forflytningen mellom disse skal være kortest mulig
- Roboten skal tåle vask med høytrykksspyling
- Det skal ikke kunne forekomme forurensning av produktene

Etttersom arbeidet med denne avhandlingen skjer i samarbeid med RobotNorge AS er det naturlig at roboten velges fra ABBs produktportefølje [4]. Det er i denne avhandlingen benyttet to roboter i serien IRB 4600, hvorav det endelige valget er IRB 4600-45/2.05. Roboten er blitt valgt etter omhyggelig testing ved hjelp av simulering for å verifisere at alle punkter er innen rekkevidde.

Som navnet tilsier har roboten nyttelast 45 kg og maksimal rekkevidde 2,05 m, vist av tabell 2.2 og figur 2.5. Produsenten har utført tester med roboten som verifiserer at oppgitt nyttelast kan forflyttes til alle posisjoner. Roboten har kapslingsgrad IP67 og kan leveres med Food-Safe olje på girkassene som ikke forurenser produktene den håndterer.

Tabell 2.2. Arbeidsområde for ABB IRB 4600-45/2.05 [1, kap. 2.2.2]

	Fra siden						Ovenfra	
	A	B	C	D	E	F	A	B
Rekkevidde [mm]	2371	1260	1028	593	1701	2051	2051	593



Figur 2.5. Arbeidsområde for ABB IRB 4600-45/2.05 [1, kap. 2.2.2]

2.3 Standarder

En standard er et dokument med krav, spesifikasjoner og retningslinjer som kan benyttes for å sikre at materialer, produkter, prosesser og tjenester er utformet til deres formål. En standard trenger nødvendigvis ikke å følges, ansvaret for å sikre at produktet er tilpasset formålet hviler i så tilfelle på produsenten. International Organization of Standardization (ISO) har utarbeidet over 19 500 standarder, hvorav mye er erfaringsbasert kunnskap. Det presenteres nedenfor et utvalg standarder som har innvirkning på arbeidet med denne avhandlingen.

- ISO 10218:2011 Roboter, sikkerhetskrav for industrielle roboter
- ISO/TS 15066:2016 Roboter, sikkerhetskrav for kollaborative roboter
- ISO 12100:2010 Maskinsikkerhet, hovedprinsipper for konstruksjon, risikovurdering og risikoreduksjon
- ISO 13855:2010 Maskinsikkerhet, krav til plassering av beskyttende utstyr
- ISO 13857:2008 Maskinsikkerhet, krav til utforming av fysiske hindre
- ISO 14159:2008 Maskinsikkerhet, hygienekrav ved utforming og konstruksjon av maskiner og verktøy
- ISO 22000:2005 Matsikkerhet, overordnede krav til næringsmiddelindustrien
- BRC Global Standard for Mattrygghet: Utgave 7, overordnede krav til næringsmiddelindustrien

2.4 Kollaborativ robot

En konvensjonell implementasjon av et robotsystem innebærer at roboten er plassert i et fysisk avgrenset og inngjerdet område, gjerne kalt en robotcelle. Dette gjøres for operatørens og robotens sikkerhet samt for å motvirke unøyaktigheter i produksjonen. Sikkerheten som oppnås med en slik implementasjon kommer på bekostning av lukkede områder som ikke kan benyttes til annet formål eller arbeide, samt begrenset bevegelighet for operatørene. Med flere nyvinninger innen sikkerhetssystemer som kan benyttes i robotsystemer er kravene i de gjeldende standarder[14, 15] blitt oppdatert.

Begrepet kollaborativ robot er vidtfavnende, ifølge Oxford Dictionaries defineres en robot som *en datamaskinstyrt robotanordning utformet for å assistere en person*. [20] Begrepet omfavner dermed menneskeliknende roboter som Hondas Asimo, så vel som tilpassede industrielle roboter. Denne oppgaven vil fokusere på sistnevnte.

Formålet med en kollaborativ robot er å kombinere de repetitive egenskapene til en robot med en operatørs evne til å oppdage feil og utføre individuell tilpasning. I motsetning til med en konvensjonell implementasjon, er det ofte ikke ønskelig at roboten skal stanse ved menneskelig interaksjon. Dette muliggjøres ved at ulike sikkerhetsanordninger benyttes for å sørge for at operatøren ikke kan komme til skade i det kollaborative arbeidsområdet. En grundig risikovurdering må gjennomføres av både robotsystemet og arbeidsområdet for å kunne iverksette nødvendige risikoreduserende tiltak.

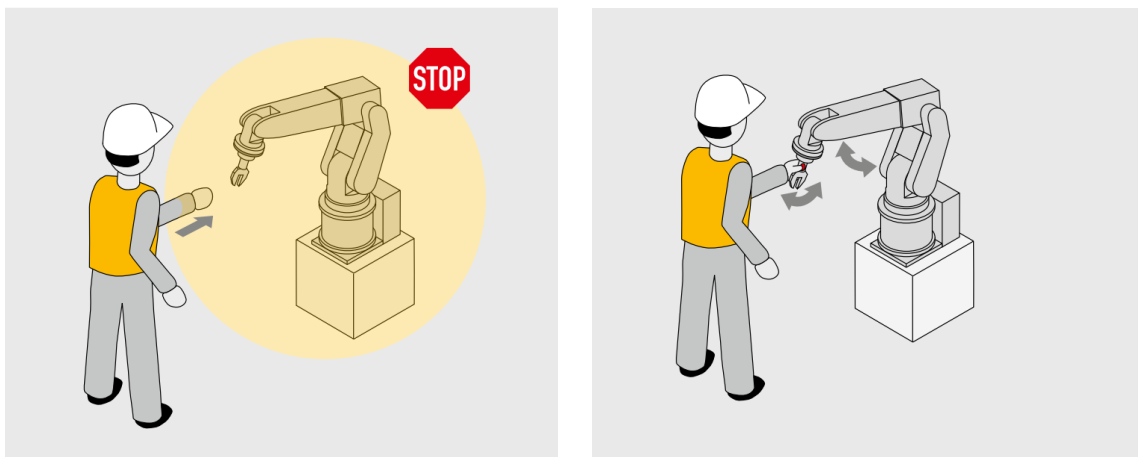
Kollaborative operasjoner kan ifølge oppdatert standard[16] inneholde én eller flere av de nedenstående metodene. De første tre metodene innebærer at det defineres en sikkerhetsavstand mellom operatør og robot, og vil i så måte oppfylle sikkerhetskravene for kollaborativitet. Standard industrielle roboter kan her benyttes, i kombinasjon med egnede sikkerhetssystemer som overvåker operatørens fart og/eller avstand i forhold til manipulatoren. Den fjerde metoden fremmer krav som bare kan oppnås med roboter som fra grunnen av er konstruert for kollaborative operasjoner.

For kollaborative robotsystemer defineres to typer soner; kollaborativt og ikke-kollaborativt arbeidsområde. Den førstnevnte omfatter de områder både robot og operatør normalt vil arbeide. Den sistnevnte omfatter de områder roboten skal arbeide alene, med få eller ingen restriksjoner.

2.4.1 Sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp

Sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp innebærer at roboten stanser før en operatør er nær nok til at en skadelig situasjon kan oppstå. Roboten kan operere uten begrensninger i det ikke-kollaborative arbeidsområdet, som skal være sikret på en slik måte at en operatør ikke kan entre dette. Likeledes kan den operere ikke-kollaborativt i det kollaborative arbeidsområdet og bevege seg fritt mellom arbeidsområdene dersom en operatør ikke er til stede. Dersom en operatør entrer det kollaborative arbeidsområdet skal roboten stanse, og kan ikke gjenoppta arbeidet før operatøren har forlatt området.

Metoden har likheter med en konvensjonell robotcelle, med fysiske barrierer byttet ut til fordel for eksempelvis fotocelle, lysgardin, laserscanner eller kamerasystem.



(a) Sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp

(b) Håndstyring

Figur 2.6. Kollaborative metoder ©Pilz GmbH & Co. KG[18] Gjengitt etter tillatelse

2.4.2 Håndstyring

Med håndstyring menes at robotens bevegelser styres av operatøren ved hjelp av en håndholdt enhet innenfor det kollaborative arbeidsområdet. Før operatøren entrer arbeidsområdet skal sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp aktiveres, slik at roboten er i denne modusen i de tilfeller den ikke utfører handlinger bestemt av operatøren. Dersom operatøren entrer arbeidsområdet uten at denne modusen er aktivert skal nødstopp automatisk aktiveres. Når operatøren ikke befinner seg i det kollaborative arbeidsområdet og sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp er deaktivert kan roboten operere ikke-kollaborativt.

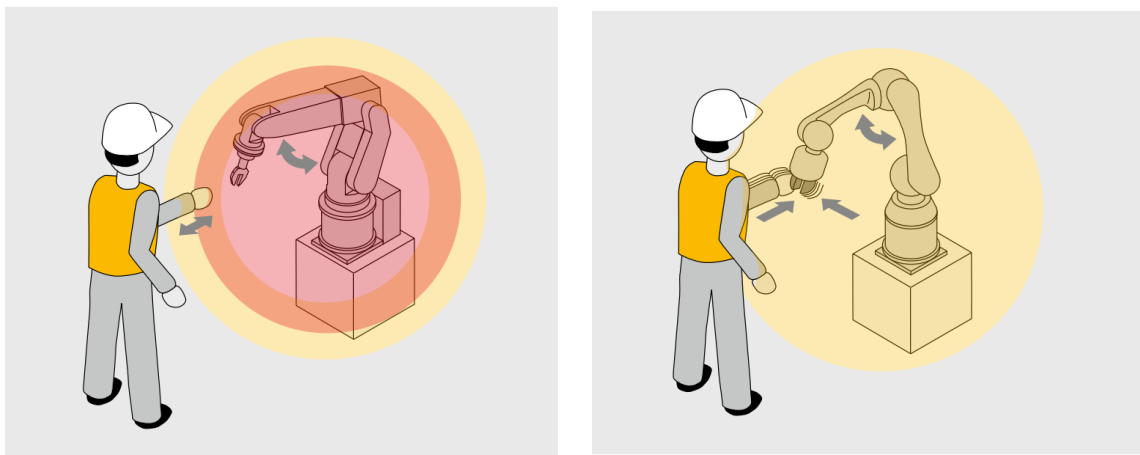
En risikovurdering må gjennomføres for å bestemme robotens tillatte maksimalhastighet, eventuelle begrensninger på leddenes utslag og arbeidsområde ved håndstyring

2.4.3 Hastighet- og avstandsovervåkning

Metoden muliggjør at roboten og operatører kan bevege seg samtidig i det kollaborative arbeidsområdet. Dette gjøres ved at området overvåkes, og den relative hastigheten til - og avstanden mellom - operatører og robot registreres og tilpasses.

Robotens tillatte hastighet og sikkerhetsavstand kan være konstant eller variabel. For konstante verdier skal det utføres en risikoanalyse som legger til grunn verst tenkelige situasjon. For variable verdier skal relativ hastighet og avstand mellom operatører og robot overvåkes med egnet system og benyttes i kontinuerlig beregning av grenseverdiene.

Roboten skal unngå å bryte sikkerhetsavstanden ved å redusere hastigheten og/eller velge en alternativ rute. Dersom sikkerhetsavstanden overskrides skal roboten stanse. Dersom avstanden igjen øker kan den automatisk gjenoppta arbeidet.



(a) Hastighet- og avstandsovervåkning

(b) Effekt- og kraftbegrensning

Figur 2.7. Kollaborative metoder ©Pilz GmbH & Co. KG[18] Gjengitt etter tillatelse

2.4.4 Effekt- og kraftbegrensning

Med effekt- og kraftbegrensning menes det at sensorer montert på og i nærheten av roboten benyttes for å unngå at fysisk kontakt som oppstår mellom operatør og robot - tilsiktet og utilsiktet - forårsaker skadelige situasjoner som overskrider tillatte grenseverdier[16, Vedlegg A]. Metoden forutsetter at det benyttes robot som er designet for bruk til kollaborativt arbeid, ikke ordinær industriell robot.

Roboten skal være designet med passive sikkerhetstiltak som slette, polstrede flater og avrundede hjørner, og aktive tiltak i form av sensorer som registrerer kontakt, begrensninger av hastighet, kraft, akselerasjon mm. Dersom disse tiltakene ikke er tilstrekkelige for å

oppfylle de ovennevnte grenseverdier kan elementer fra de tre foregående metodene benyttes. Dersom en operatør kommer i klem mellom robotens ledd eller mellom robot og annet utstyr i arbeidsområdet skal det være mulig å unnsnippe uten ekstern hjelp.

En grundig risikovurdering skal gjennomføres der alle potensielle skadelige situasjoner skal identifiseres, utfallet av disse skal evalueres, og systemet skal designes slik at situasjonene kan unngås, eller at frekvensen av disse reduseres og skadepotensialet minimeres. Elementer i risikovurderingen vil være størrelsen på, og plasseringen av kontaktområdet, relativ hastighet mellom operatør og kolliderende del, kraft, trykk, kraftmoment og energi. Kontakt med sensitive kroppsdeler som bakhode, strupehode, øyne, ører og ansikt skal unngås så langt det lar seg gjøre. Det skal tas utgangspunkt i at operatøren ikke benytter personlig verneutstyr. Skjærende og stikkende objekter skal ikke være tilstede i arbeidsområdet.

I motsetning til ABB leverer Universal Robots og Fanuc større kollaborative industrielle roboter med løfteevne opp mot hhv. 10 og 35 kg som oppfyller kravene til effekt- og kraftbegrensning. De aktuelle modellene har kapslingsgrad IP54, hvilket betyr at de må utstyres med en vernedrakt for å kunne benyttes i områder med høye krav til renhold. Drakten vil ha en negativ påvirkning til sensorenes reaksjonsevne. Denne metoden vil ikke bli tatt med i betraktning i det videre arbeidet med avhandlingen.

2.5 Sikkerhetssystemer

Dette delkapittelet omhandler sensorer som kan benyttes for oppbygning av et sikkerhetssystem for bruk i et kollaborativt robotsystem [15, 5.10.5.1] og i hvordan avstanden mellom disse og roboten beregnes. Det presenteres også hvordan fysiske hindre skal implementeres for robotsystemer som ikke er kollaborative.

2.5.1 Lysbom og lysgitter

Lysbom og -gitter er fotoelektriske sensorer, hvilket innebærer at en lyskilde (LED) benyttes for å sende ut et pulserende lyssignal som registreres og analyseres. Det er i hovedsak tre metoder fotoelektriske sensorer kan konstrueres etter.

En diffus sensor har sender og mottaker i samme enhet. Nærværet av et objekt registreres ved at lyssignalet reflekteres i objektet og registreres av mottakeren. Graden av refleksjon avhenger av objektets materiale og farge, og egner seg derfor for et begrenset antall materialer og begrenset avstand. Denne typen benyttes ikke i sikkerhetssystemer.

Retro-refleksive sensorer har som med diffus metode sender og mottaker i samme enhet. Det benyttes i tillegg en reflektor som monteres i motsatt ende av sikkerhetsområdet. Nærværet av et objekt registreres ved at lysstrålen brytes.

For en gjennomgående sensor er sender og mottaker to separate enheter. Sensoren aktiveres ved at et objekt bryter lysstrålen. Denne typen har lengst rekkevidde og er mest utbredt i sikkerhetssystemer.

Lysbom og -gitter er prinsipielt samme type sensor, avstanden mellom lyskildene er derimot ulik. En lysbom kan ha én til fire lyskilder med avstand mellom 300 mm og 500 mm alt etter bruksområde. Lysgitter er utstyrt med flere lyskilder med avstander ned til 14 mm. Denne avstanden sikrer registrering av objekter på størrelse med fingre. Både lysbom og -gitter har kort reaksjonstid, men kan bare overvåke et begrenset område i ett plan.

2.5.2 Laserscanner

En laserscanner består av én eller flere lasere og mottakere montert over et roterende vinklet speil i en enkelt enhet. Laserscanneren måler kontinuerlig avstand til omkringliggende objekter i et område opp mot 270°. Ved implementasjon av laserscanner programmeres området den skal overvåke, som gjerne inndeles i soner dersom flere maskiner skal sikres og stanses uavhengig av hverandre. Sensoren må ha fri sikt til sikkerhetsområdet ettersom den ikke kan se rundt objekter. Laserscanneren kan monteres horisontalt for å dekke et større gulvareal, eller vertikalt for å dekke eksempelvis fronten av en maskin eller åpning i et gjerde.

Laserscannere har lengre reaksjonstid enn lysbom og -gitter. Dette kommer primært av tiden speilet trenger for å rotere en full runde. For horisontal bruk monteres laserscanneren i knehøyde eller lavere, bevegelser av overkroppen vil dermed ikke registreres. Som med lysbom og -gitter kan en laserscanner bare overvåke i ett plan.

2.5.3 3D-kamera

Et 3D-kamerasystem består av en kamerapakke, en kraftig datamaskin og et kontrollsystem for kommunikasjon med maskinene i sonen som skal overvåkes. Kamerapakken består av tre kamera med høy oppløsning som kontinuerlig sender bilder til datamaskinen. Ved hjelp av avansert bildebehandling skapes en 3D-modell av rommet og det gjennomføres objektgjenkjenning. Dette systemet har store likheter med teknologien som utvikles for autonome biler. Kamerapakken monteres over sonen slik at det har full oversikt over maskineri og operatører. Med økt avstand til sonen reduseres nøyaktigheten til systemet.

3D-kamera overvåker et tredimensjonalt område, og har dermed potensiale til å erstatte sikkerhetssystemer med flere todimensjonale sensorer. Det er mulighet for å definere kom-

plekse soner, hvilket muliggjør mer ergonomisk utforming av arbeidsområdet. Kameraene kan derimot ikke se hva som befinner seg under maskineri, og må i noen tilfeller suppleres med andre sensorer. Bildene behøver avansert og tidkrevende analyse for objektgjenkjenning, hvilket gir stort utslag i reaksjonstiden til systemet.

2.5.4 Beregning av sikkerhetsavstand

Utregning av sikkerhetsavstand for kollaborative systemer tar utgangspunkt i den generelle formelen for et systems evne til å stanse [13, 5.2], modifisert for å ta høyde for farer som oppstår ved hastighets- og avstandsovervåking [16, 5.5.4.2.3]. Dersom det benyttes systemer for kontinuerlig overvåking av robotens og operatørens lokasjon og hastighet benyttes formel 2.1 for å kontinuerlig kalkulere sikkerhetsavstanden. Dersom et slikt system ikke benyttes skal verst tenkelig plassering og hastighet på robot og operatør legges til grunn i formelen. Inntrengningsdistansen C beregnes ulikt avhengig av sensorens deteksjonsevne, monteringshøyde og deteksjonssone [13, 6.2.3].

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (2.1)$$

Hvorav:

$$S_h = \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_h(t) dt \quad (2.2)$$

$$S_r = \int_{t_0}^{t_0+T_r} v_r(t) dt \quad (2.3)$$

$$S_s = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt \quad (2.4)$$

$$C = \begin{cases} \text{Deteksjonssone } \perp \text{ bevegelsesretning og } d \leq 40 \text{ mm:} \\ 8(d - 14) \text{ mm, } \not\leq 0 \text{ mm} \\ \text{Deteksjonssone } \perp \text{ bevegelsesretning og } 40 < d \leq 70 \text{ mm:} \\ 850 \text{ mm} \\ \text{Deteksjonssone } \parallel \text{ bevegelsesretning og } H \leq 300 \text{ mm:} \\ 1200 - 0,4H \text{ mm} \end{cases} \quad (2.5)$$

$S_p(t_0)$	Resulterende sikkerhetsavstand
t_0	Nåværende tid
S_h	Operatørens forflytning
S_r	Robotens forflytning ila reaksjonstiden
S_s	Robotens stoppdistanse
C	Inntrengningsdistanse - før en kroppsdel detekteres
Z_d	Posisjonsusikkerhet for operatør, sensorsystemets måletoleranse
Z_r	Posisjonsusikkerhet for robot, nøyaktighet til posisjoneringssystemet
T_r	Reaksjonstid for robotsystemet, fra detektering av inntrengning til stopp aktiveres
T_s	Stoptid for roboten, fra stopp aktiveres til full stans
t	Integrasjonsvariabel
$v_h(t)$	Operatørens fart i retning mot roboten
$v_r(t)$	Robotens fart i retning mot operatøren
$v_s(t)$	Robotens fart etter stopp er aktivert
d	Sensorens deteksjonsevne
H	Sensorens monteringshøyde

2.5.5 Fysiske hindre

Den konvensjonelle metoden for å bygge robotiserte systemer innebærer at roboten isoleres fra operatøren ved hjelp av fysiske hindre i form av gjerder. Disse leveres i forskjellige materialer som aluminium, stål, rustfritt stål og pleksiglass, og med ulike overflatebehandlinger, lakkerte eller forsinket. For næringsmiddelindustrien benyttes gjerder i rustfritt stål.

Krav til høyde for inngjerding av en robotcelle er minimum 1400 mm fra tilstøtende gangbart underlag [15, 5.10.4.2]. Dersom et flettet gjerde benyttes skal størrelsen på åpningene i dette tilpasses etter avstanden de monteres fra robotens arbeidsområde. Eksempelvis vil en åpning fra 12 til 20 mm kunne benyttes ved sikkerhetsavstand over 120 mm [12, 4.2.4]. Utforming av gjerdet må være slik at en operatør ikke kan rekke over, under eller gjennom gjerdet for dermed å nå inn robotens arbeidsområde.

Kravene til gjerdets styrke bestemmes av hvorvidt det bare skal forhindre operatøren i å entre robotcellen eller om det også skal forhindre roboten i å forlate sitt definerte arbeidsområde dersom en feil skulle oppstå. Dersom robotens bevegelser begrenses av stoppklosser på leddene eller egnet sikkerhetssystem som stanser dens bevegelser er det tilstrekkelig å oppfylle førstnevnte krav.

2.6 RobotStudio®

RobotStudio er et dataprogram utviklet av ABB for bruk ved konstruksjon av robotsystemer. Programmet kan benyttes for både fysiske og virtuelle ABB-roboter, og gjør det dermed mulig å programmere, modellere, teste og verifisere komplette løsninger før instruksjonene lastes over på fysiske roboter når installasjon finner sted. RobotStudio er delt opp i ulike faner for den spesifikke del av prosjektet:

Første fane omfatter 3D-modellering av arbeidsområdet. Her lastes den virtuelle roboten inn fra en database. Verktøy, maskiner og andre objekter kan lastes inn som 3D CAD-filer, eventuelt kan enkle objekter skapes her. Strukturer som vegger og gulv kan legges til for å gjøre modellen mer virkelighetstro.

Under simuleringsfanen opprettes workobjects, ulike koordinatsystem som kan tilegnes et objekt eller en fast plassering i rommet, samt robtargets, posisjoner som roboten skal forholde seg til. Enkle baner med lineære eller leddbevegelser mellom robtargets kan lages her, for mer komplekse operasjoner er det mer hensiktsmessig å benytte Rapid-kode. Komplette eller deler av prosjektet kan simuleres i fanen som om de skulle ha vært fysiske løsninger. Kollisjoner kan detekteres ved enkel implementering, og bevegelser på omkringliggende materiell og maskineri kan gjenskapes ved hjelp av «Smart Components».

Smart Components er et verktøy under simuleringsfanen som gir virtuelle maskiner og utstyr mer komplekse egenskaper. Formålet er å gjenskape de bevegelser de innehar i den fysiske verden med samme inn- og utganger til Rapid. Et typisk bruksområde er å gi en griper mulighet til å bevege leddene og feste samt slippe tak på objekter den skal forflytte. I verktøyet kan blant annet følgende funksjoner benyttes:

- Logiske porter som AND, OR, NOR, NOT
- Timere og pulsgeneratorer
- Sensorer av ulike typer; plan, linje og volum
- Attacher og detacher hhv. aktiverer og deaktiverer en binding mellom to objekter
- Source og sink hhv. skaper og fjerner et nytt objekt
- LinearMover og rotator setter objekter i ulike bevegelser

Rapid er et høynivå programmeringsspråk som benyttes for programmering av industrielle ABB-roboter. *Språket inneholder funksjoner som rutineparametre, logiske og aritmetiske uttrykk, automatisk feilhåndtering, modulære programmer og multitasking. RobotStudio inneholder en egen kompilator for Rapid, med funksjoner som kodefullføring og avluser.*[10][2.4.2] Robotens bevegelser baseres på forflytning mellom punkter. Disse punktene tar utgangspunkt i tidligere nevnte robtargets, hvor plassering og orientering i forhold til

workobject er definert. Punktene kan defineres som et gitt robtarget eller med en offset i distanse og/eller orientering fra dette. Det benyttes i all hovedsak to typer bevegelsesfunksjoner som gir lineære bevegelser eller leddbevegelser.

Lineære bevegelser kan eksekveres med bla. instruksjonen MoveL. Robotens verktøy vil bevege seg i en rett linje mellom foregående og neste punkt, en forutsigbar bevegelse. For å oppnå dette må de ulike leddene på roboten roteres med varierende hastighet, hvilket forårsaker belastning på leddenes motorer. Leddene kan ikke roteres mer enn 90°, hvilket innebærer at større leddutslag må utføres ved hjelp av flere instruksjoner. MoveL benyttes der det er behov for stor grad av presisjon.

Leddbevegelser eksekveres med bla. instruksjonen MoveJ. Den nødvendige rotasjonsdistansen for hvert ledd vil dermed beregnes, og forflytning gjennomføres ved at hvert ledd beveges med hver sin konstante hastighet. Instruksjonen medfører lavere belastning på leddenes motorer på bekostning av en mer uforutsigbar bevegelse. MoveJ benyttes for forflytning over et større område der det ikke er fare for kollisjoner og/eller der orientering av verktøyet i løpet av forflytningen er av liten betydning.

Bevegelsesinstruksjonene kan videre spesifiseres ved hastighet og hvor avrundede hjørnene i en bane mellom flere punkter skal være. Egne bevegelsesinstruksjoner for aktivering av digitale og analoge utganger underveis i banen finnes, hvilket f.eks. kan benyttes for aktivering av vakuumpump til et verktøy med sugekopp. Instruksjonene i Rapid begrenser seg ikke til rene bevegelser. Verdier på innganger kan avleses, behandles og logges i robotens minne, digitale og analoge verdier på utganger kan settes, og informasjon kan presenteres på robotens håndholdte betjeningspanel, FlexPendant. Betjeningspanelet kan benyttes for å lese av loggen og meldinger, lese og endre parametere, samt manuelt styre roboten.

SafeMove er en funksjon som kan implementeres i robotsystemet ved behov. Tidligere har endestoppere montert på robotens ledd vært eneste alternativ for å begrense dens bevegelser både for å unngå skade på roboten og for å begrense dens arbeidsområde. SafeMove tilbyr utvidet funksjonalitet ved at arbeidsområdet kan bestemmes som en tredimensjonal sone. Flere overlappende soner kan opprettes med begrensninger for hastighet og akselerasjon til robotens ulike ledd og verktøy, og hvorvidt roboten og/eller verktøyet kan entre sonen. SafeMove kan kommunisere med overordnede sikkerhetssystemer ved at digitale utganger blir satt etterhvert som roboten entrer eller forlater en sone.

2.7 Autodesk Inventor®

Autodesk Inventor er et dataassistert konstruksjonsprogram (DAK) for mekanisk konstruksjon. Det benyttes for tredimensjonal tegning av mekaniske komponenter og konstruksjoner, validering av form og funksjon samt testing av fysiske påkjenninger før produktet blir produsert. Etter konstruksjonen er fullført i Inventor kan 3D-modellenes funksjon simuleres i programmet og modellene kan eksporteres for bruk i andre simuleringsverktøy. Konstruksjonstegninger til bruk for maskinverksted kan skrives ut sammen med byggeanvisninger for den komplette konstruksjonen.

2.8 Hygiene

Næringsmiddelaktøren benytter BRC Global Standard for Mattrygghet for å kvalitetssikre hygienen i alle ledd av produksjonen. For den robotiserte løsningen innebærer dette at alt utstyr skal konstrueres i rustfritt stål eller tildekkes på en slik måte at det ikke kan forurense produktene. Utstyret skal være utformet slik at renhold kan utføres på mest mulig effektiv måte, uten lukkede rom og falsede skjøter som spesifisert i gjeldende standard [11]. Det skal tåle jevnlig nedvask i form av høytrykksspyling.

Alle oljer i den valgte roboten er Food-Safe og den er klassifisert med kapslingsgrad IP67. Den er imidlertid ikke konstruert i rustfritt stål og må dermed tildekkes på hensiktsmessig måte. Vanlig praksis er å dekke roboter til med en vernedrakt tilpasset formålet, som vist av figur 2.8. Drakten blåses opp for å skape overtrykk som sikrer at partikler fra produksjonen ikke trenger inn, og den er motstandsdyktig for høytrykksvask.

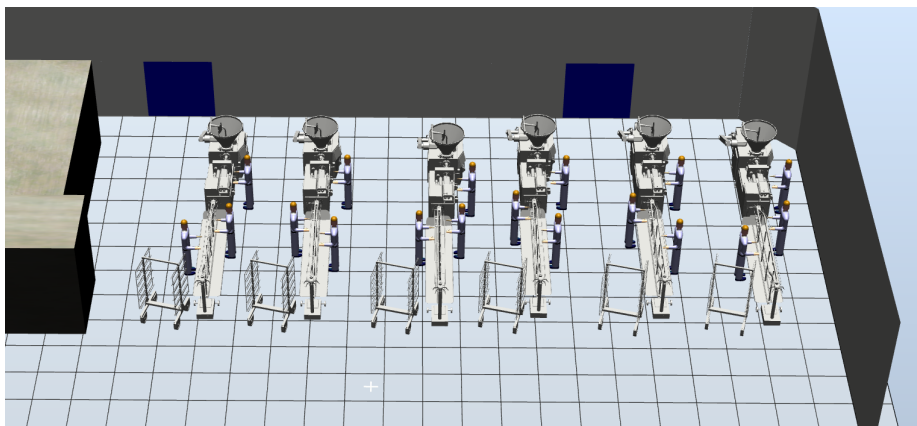


Figur 2.8. Vernedrakt for robot, ASP [6]

3 Implementasjon

3.1 Planløsning

Produksjonslokalets utforming er sentral for å oppnå best mulig produksjonsflyt. Næringsmiddelaktøren har lagt ned mye tid i planlegging av lokalet og valg av produksjonsutstyr. Arbeid med planløsning er en prosess som pågår frem til installasjonen finner sted. Dette delkapittelet presenterer flere alternativer til løsning, samt enkelte som har klare mangler. Dette for å unngå å bruke mye tid senere på løsninger som ikke lar seg realisere.



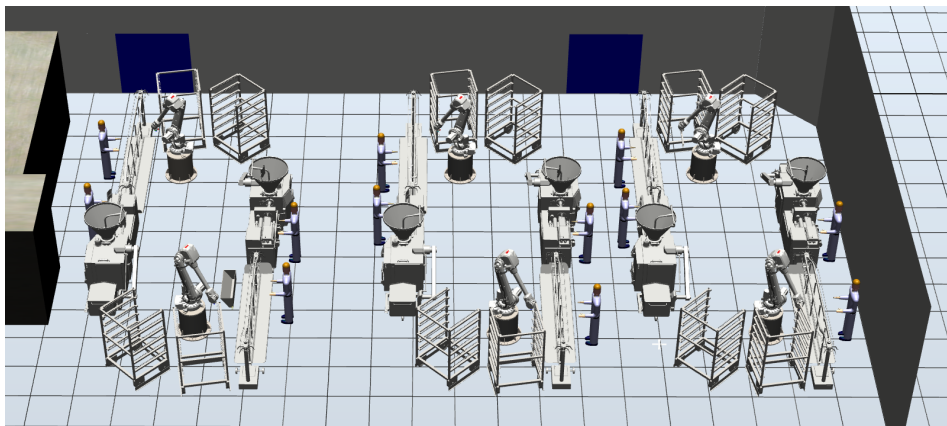
Figur 3.1. Produksjonslokalets nåværende utforming. Utviklet i RobotStudio [3]

3.1.1 Utgangspunkt

Av figur 3.1 sees produksjonslokalets utforming slik det fremstår i dag. All pølsemasse blir produsert i tilstøtende rom bakerst i bildet og transportert til produksjonslokalet i rør eller egne transportvogner. Ferdige rå pølser forlater produksjonslinjen i bildets forkant, og blir transportert i vogner til røykeovner. Ovnene kan ikke sees av figuren, de er plassert i bildets forkant. Tilførsel av tomme røykevogner og røykespyd skjer fra egen sluse i bildets høyre nedre hjørne. Hver av de seks produksjonslinjene betjenes av tre operatører, hvorav én

betjener pølsestopperen, én knytter endene på hver lengde med pølser, og én forflytter pølser fra opphengsmaskinen til røykevognen. Fulle vogner transporteres fra produksjonslinjene til røykeovnene etter behov. Det arbeides to skift på alle linjer. Produksjonsflyten går her naturlig gjennom rommet uten unødvendige transportetapper.

Alle maskinene er påmontert hjul for enkel forflytning når renhold skal utføres. Det er dermed fritt frem for å flytte maskinene til de posisjoner som egner seg best. Det vil derimot ved en endring av planløsning være nødvendig å gjøre endringer på rørsystemet som transporterer pølsemassen.



Figur 3.2. Lukkede celler og dårlig produksjonsflyt. Utviklet i RobotStudio® [3]

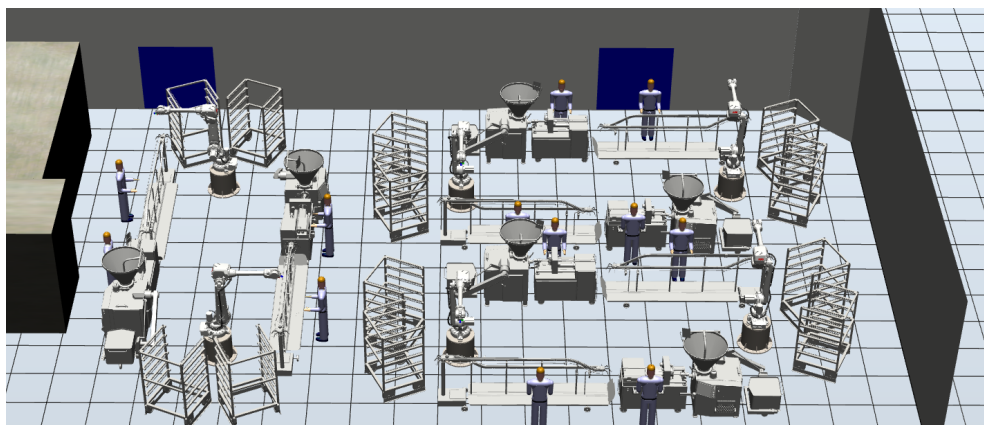
3.1.2 Første utkast

Den første planløsningen kan sees av figur 3.2. Det er tatt utgangspunkt i at hver produksjonslinje er utstyrt med to røykevogner for å motvirke avbrudd i produksjonen ved skifte av vogn. For å oppnå dette er en ny røykevogn utviklet, se utfyllende forklaring i kapittel 3.4. Vognene har fast plassering, som sikres ved egne skinner festet i gulvet. Hyllene fylles nedenfra og opp, og starter med hyllen lengst vekk fra roboten.

Annenhver produksjonslinje er snudd 180° og forskjøvet i lengderetning, som kanskje er den mest åpenbare forandringen fra nåværende planløsning. Dette er gjort for å skape lukkede områder for robotene å bevege seg i, totalt tre robotceller á to roboter. Hver produksjonslinje opereres av én robot, naturlig skilt fra operatørene ved hjelp av produksjonsutstyret. Ved å lage lukkede områder kan ett par roboter benytte det samme sikkerhetssystemet, og totalt antall sensorer kan reduseres.

Ved å snu linjene betjener robotene opphengsmaskinen fra samme sted som operatørene gjør i dag, som medfører at det ikke gjøres modifikasjoner på eksisterende maskiner.

Endringen medfører dog en betydelig forstyrrelse i produksjonsflyten. Pølsemasse og røykevogner må med denne løsningen transporteres til begge ender av rommet. Transporten må gjennomføres på innskrenkede områder ettersom store deler av gulvarealet er reservert for robotene.



Figur 3.3. Rotet planløsning med liten plass til operatør. Utviklet i RobotStudio [3]

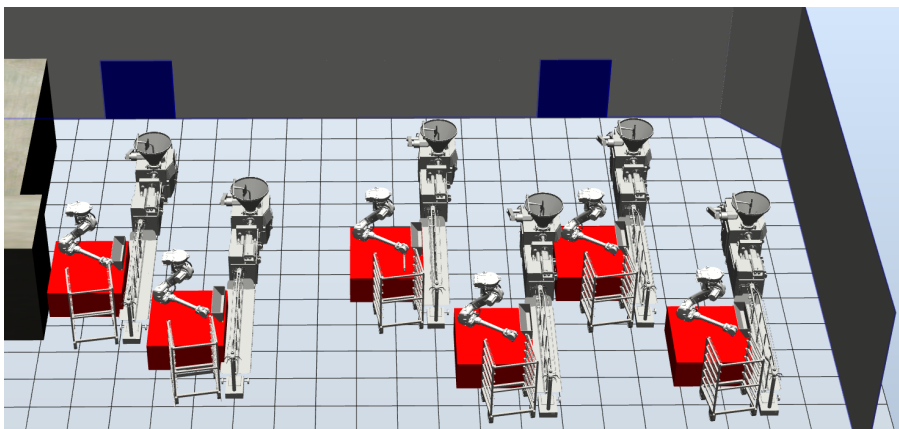
3.1.3 Andre utkast

I et forsøk på å begrense transportbehovet er fire av linjene rotert 90° som vist av figur 3.3. Grunnprinsippet for løsningen er det samme som for første utkast, forskyvningen mellom hvert par av produksjonslinjer er derimot fjernet for å få plass i rommets lengderetning. Endringen medfører at det skapes to «korridorer» for transport av pølsemasse og røykevogner, i hver ende av produksjonslinjene til høyre i bildet. Disse er begrenset i størrelse ettersom gulvarealet reservert til robotene har økt. Transportavstandene har med denne løsningen avtatt noe, på bekostning av forverret produksjonsflyt.

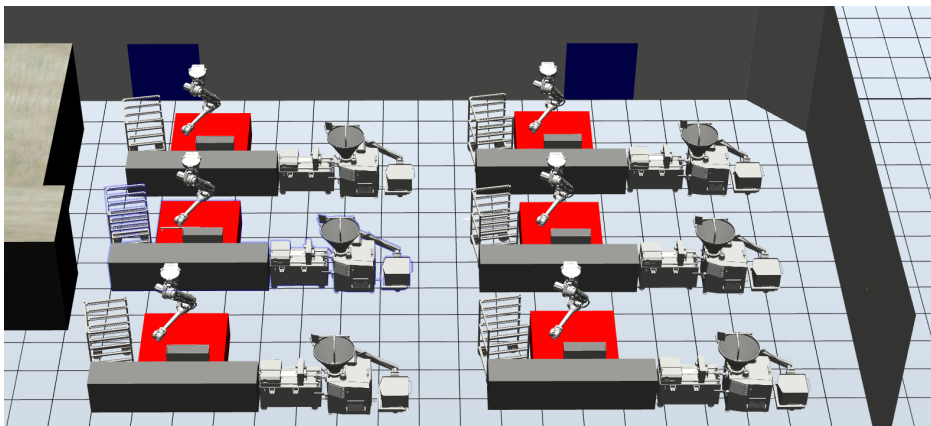
3.1.4 Mislykkede forsøk

Under arbeidet med planløsning er det vurdert å ikke lage til «celler» for robotene, men heller arrangere produksjonslinjene som om operatørene hadde blitt direkte byttet ut med roboter. Dette fordrer at gode sikkerhetsmekanismer innføres, og stiller strenge krav til sikkerhetsavstand mellom robot og operatør, samt raske og pålitelige sikkerhetssystemer. To av disse forsøkene er her presentert, hvorav figur 3.4a er noenlunde lik dagens planløsning med noe forskjøvede produksjonslinjer, og figur 3.4b er en rotert løsning med en kortere modell av opphengsmaskinen.

I begge figurer er robotens arbeidsområde markert ved et rødt felt, dette feltet inkluderer ikke de nødvendige sikkerhetsavstander. Som det kan sees av figurene er produksjonslinjene plassert tett opptil hverandre, og det vil ved denne type implementasjon være liten avstand mellom operatører og roboter. Selv med oppdatert regelverk for kollaborativitet og moderne sikkerhetsmekanismer er det ikke mulig å benytte konvensjonelle industrielle roboter i disse løsningene, til det må hastigheten på roboten begrenses i en slik grad at oppgaven den blir satt til å gjøre ikke kan gjennomføres uten å redusere produksjonshastigheten. Roboter som er beregnet for kollaborative oppgaver, med polstrede ledd og trykkfølsomme sensorer, kan imidlertid benyttes dersom de oppfyller kravene til renhold og hygiene.



(a) God produksjonsflyt, men ingen plass til operatør



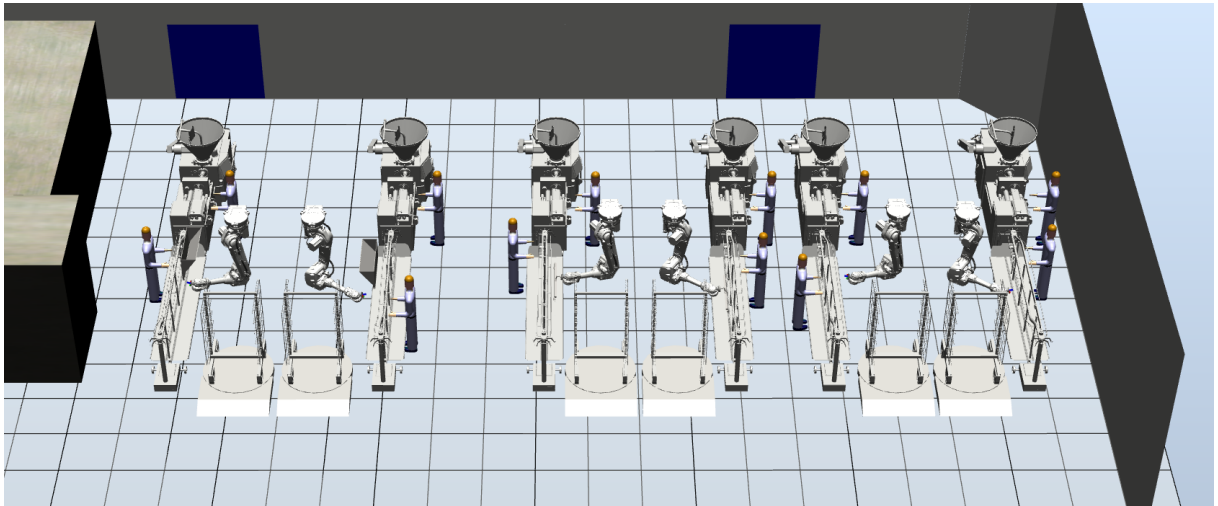
(b) Rotert 90°, for liten avstand mellom robot og operatør

Figur 3.4. Mislykkede forsøk på planløsning. Utviklet i RobotStudio [3]

3.1.5 Foreslått planløsning

Etter møter med næringsmiddelaktøren ble det klart at det ikke er nødvendig med to røykevogner ved hver linje. Økt gulvareal veier i stor grad opp for ulempen ved produksjonsstans ved bytte av røykevogn. Det var ønskelig å benytte eksisterende vogner, hvilket førte til implementering av en rondell ved hver produksjonslinje. Rondellen snur vognene 180° når den ene siden er full, slik at roboten får tilgang til alle hyller. Ved i tillegg å endre plassering av roboten slik at den blir takhengt, forenkles ikke bare renholdet, det er også mulig å benytte en robot av mindre størrelse. Endringene kan sees av figur 3.5.

Det er tatt utgangspunkt i at rotasjonsretningen til opphengsmaskinen kan endres, og benytte disse sammen med røykevognene for å opprette lukkede «celler» som omslutter robotenes arbeidsområde. Dette medfører at arbeidsområdet opptar mindre gulvareal og at produksjonsflyten beholdes tilsvarende dagens løsning.



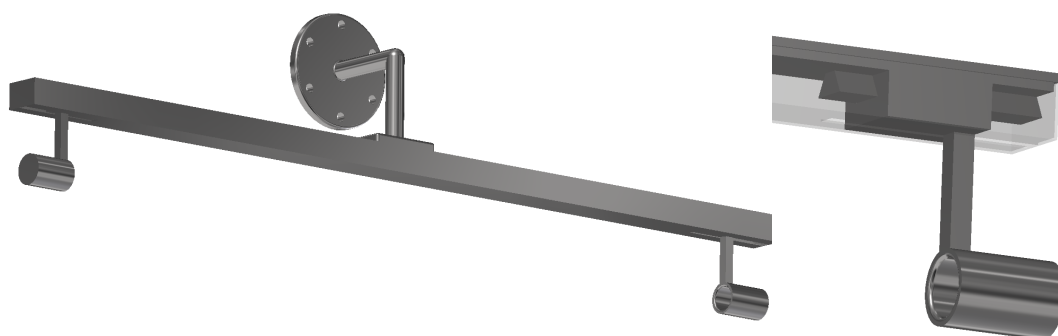
Figur 3.5. Foreslått planløsning med forbedret produksjonsflyt. Utviklet i RobotStudio [3]

3.2 Verktøy

Som nevnt i kapittel 1.3.2 har Handtmann GmbH utviklet en robotisert løsning for forflytning av røykespyd. Noen av de samme prinsippene er tatt med i designet av dette verktøyet, da røykespydet får rotere fritt under forflytning, og fremføring av røykespyd skjer ved hjelp av eksternt utstyr. Verktøyet er designet i Autodesk Inventor, primært for bruk i simulering av robotløsningen. Den kan brukes som underlag for videre utvikling og produksjon av fysisk verktøy.

Verktøyet er utviklet med tanke på at opphengsmaskinen skal gå kontinuerlig med varierende avstand mellom partiene med pølser. Verktøyet består av to hylser, hvorav den ene er stengt i ytre ende, montert på et stag, se figur 3.6. Hylsenes oppheng er montert på en glideskinne, og skal utstyres med sylindere for bevegelse mellom to posisjoner i lengderetning. Staget har et vinklet ledd for økt rekkevidde. Alle deler er tenkt produsert i rustfritt stål for å oppfylle hygienekrav for næringsmiddelindustrien [11], verktøyet vil dermed veie i overkant av 6 kg. Alle ytre deler er avrundet for å lette renholdet samt unngå kuttskader. Ved å benytte bevegende hylser istedenfor konvensjonell griper vil klemskader på operatør og produktskader begrenses.

Verktøyet er tiltenkt å arbeide med et eget magasin for fremføring av røykespyd, se kapittel 3.3. Når et parti med pølser føres frem på opphengsmaskinen skal verktøyet gå inn i posisjon slik at hylsene befinner seg i hver ende av pølsepartiet. Magasinet fører ut et røykespyd, gjennom første hylse, pølsepartiet, og inn i andre hylse. Deretter hektes pølsene av krokene på opphengsmaskinen før de transporteres til rett hylle i røykevognen. Ved å aktivere sylindrene beveges hylsene utover og det fulle røykespydet faller ned 1 cm til riktig plassering i hyllen.

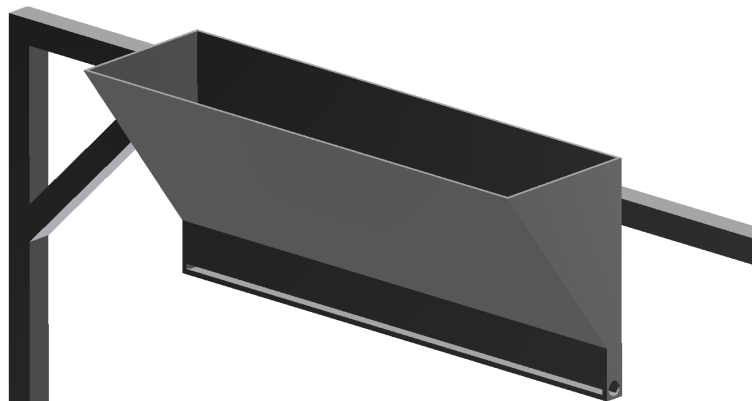


Figur 3.6. Egendesignet verktøy. Tegnet i Autodesk Inventor [7]

3.3 Magasin for røykespyd

Innretningen for fremføring av røykespyd består av et magasin formet som en trakt, montert på en lineærføring som plasseres over opphengsmaskinen, se figur 3.7. På magasinet monteres en sylinder med arm plassert i sporet som kan sees på nedre del av magasinet. Denne skyver røykespydene frem enkeltvis gjennom hullet til høyre. For å styre denne bevegelsen er det nødvendig med en induktiv giver ved hullet som registrerer at robotens verktøy er i riktig posisjon.

Magasinet beveger seg med lineærføringen i samme hastighet som opphengsmaskinen. Denne bevegelsen initieres av en avstandssensor montert på magasinet som registrerer avstanden til pølsepartiet. Rapportering av posisjon til robotsystemet kan skje enten ved hjelp av utslag på drivmotoren til lineærføringen eller separat avstandssensor. Når induktiv giver på magasinet registrerer at verktøyet ikke lenger er tilstede stanser bevegelsen, og magasinet forflyttes til startposisjon eller neste pølseparti.



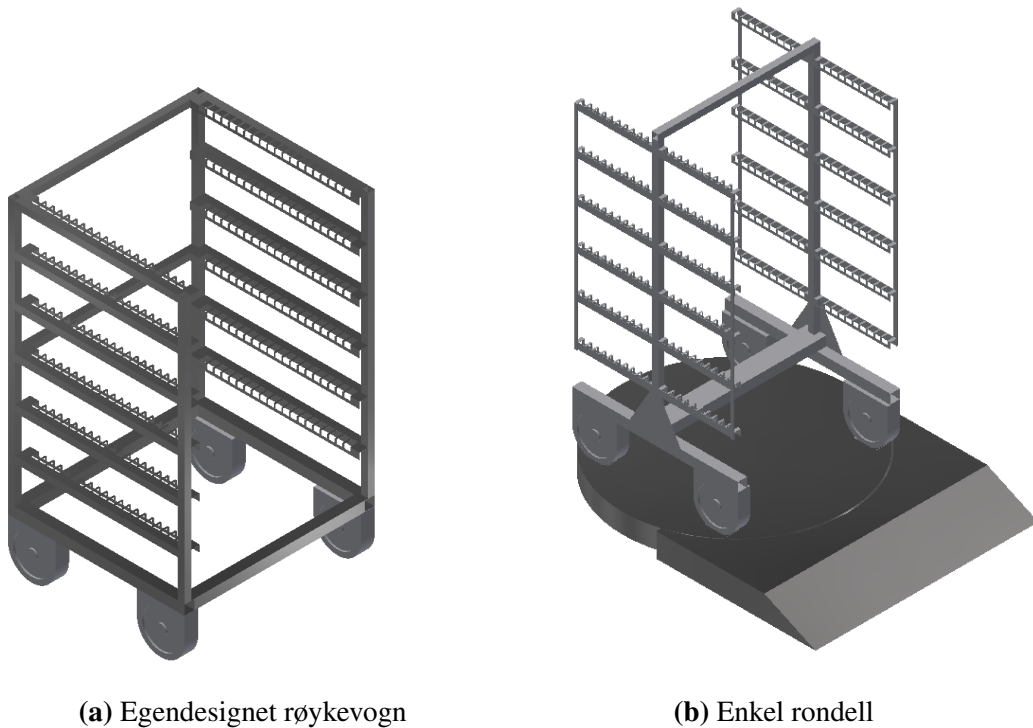
Figur 3.7. Egendesignet magasin for røykespyd. Tegnet i Autodesk Inventor [7]

3.4 Rondell og ny røykevogn

I første utkast til planløsning omtalt i kapittel 3.1.2 ble det klart at roboten ikke har mulighet til å nå alle hylleposisjoner ved fast plassering av original røykevogn. Den øverste bjelken i støtterammen som sett av figur 3.8b hindrer roboten i å nå de tre øverste bakre hyllene, i tillegg til at verktøyet må entre vognen vinklet for å gå klar av den ytre støttestrukturen. Det er utarbeidet to alternativ til løsning på denne utfordringen.

En modifisert røykevogn kan sees av figur 3.8a med hyller montert i en kasseformet støttestruktur i motsetning til den originale rammeformede strukturen. Bredden er utvidet med 40mm for å unngå den vinklede entringen, noe som bedrer syklustiden marginalt. Antall hyller, avstand mellom disse, samt alle andre fysiske mål er beholdt for å sikre at røykevognen samstemmer med tilknyttet maskineri. Vognen er benyttet i de første forlag til planløsning.

I siste forslag til planløsning benyttes de originale røykevognene sammen med en rondell som vist av figur 3.8b. Rondellen har to posisjoner rotert 180° i forhold til hverandre. Etter bytte av røykevogn fylles først bakre del av vognen, rondellen roterer til andre posisjon og fremre del av vognen fylles før rondellen returnerer til utgangsposisjon, klar til bytte av vogn. Skifte mellom posisjonene er tenkt styrt direkte fra robotsystemet og overvåket av det samme sikkerhetssystemet som for resten av robotcellen.



Figur 3.8. Utstyr tegnet i Autodesk Inventor [7]

3.5 RobotStudio

Dette delkapittelet utdyper arbeidet som er utført med visualisering, programmering, simulering og implementasjon av sikkerhetssystemer i ABBs dataprogram RobotStudio.

3.5.1 Modellering

Produksjonslokalet er gjenskapt i RobotStudio etter korrekte mål ved å modellere rommet ut fra plantegning fremskaffet av produsenten. Likeledes er dagens utforming av produksjonslokalet med tilhørende maskiner modellert med utgangspunkt i den samme tegningen. 3D-modeller av maskiner levert av Vemag er skaffet til veie av deres importør i Norge, MPack AS. Modellene var i utgangspunktet svært detaljerte, de ble derfor modifisert noe i Autodesk Inventor før importering i RobotStudio. Resterende utstyr er i sin helhet konstruert i Autodesk Inventor. Røykevogn er gjenskapt etter målsatt tegning fra produsenten.

I arbeidet med planløsning er en relativt ny funksjon i RobotStudio tatt i bruk, virtuell virkelighet (VR) ved hjelp av HTC Vive. Funksjonen gjør det mulig å gå rundt i det virtuelle rommet og kontrollere at maskiner og utstyr er plassert på en fornuftig måte og at det er nok rom for operatørene å arbeide og bevege seg. HTC Vive er blitt benyttet aktivt i både planleggingsfasen og under demonstrasjon for veileder og representant fra produsenten.

3.5.2 Programmering

Rapid er benyttet for all programmering av robotenes bevegelser, styring av robotens verktøy og rondell, samt overvåkning av posisjon til pølser på opphengsmaskinen. Et fåtall robtargets er definert for forflytning av roboten;

- Venteposisjon ved opphengsmaskinen
- Henteposisjon i pølsenes bane rundt opphengsmaskinen
- Mellomposisjon for forflytning til/fra røykevogn
- Fire posisjoner for å navigere verktøy inn i røykevogn
- Referanseplassering i røykevognen

Røykevognen er utformet slik at avstanden er lik mellom alle hyller og mellom alle plasseringer i hyllene. Fordeling av røykespyd skjer ved å først kalle på en subrutine som beregner avstand fra referanseposisjonen ut fra hvilken type pølse som skal forflyttes og hvilket røykespyd i rekken som behandles. Rekkefølgen i plassering er lik for alle typer pølser, det begynnes innerst på nederste hylle og utover, én hylle om gangen. Øverste hylle behandles av egen subrutine ettersom den har en enklere bane. Innerste og ytterste plassering

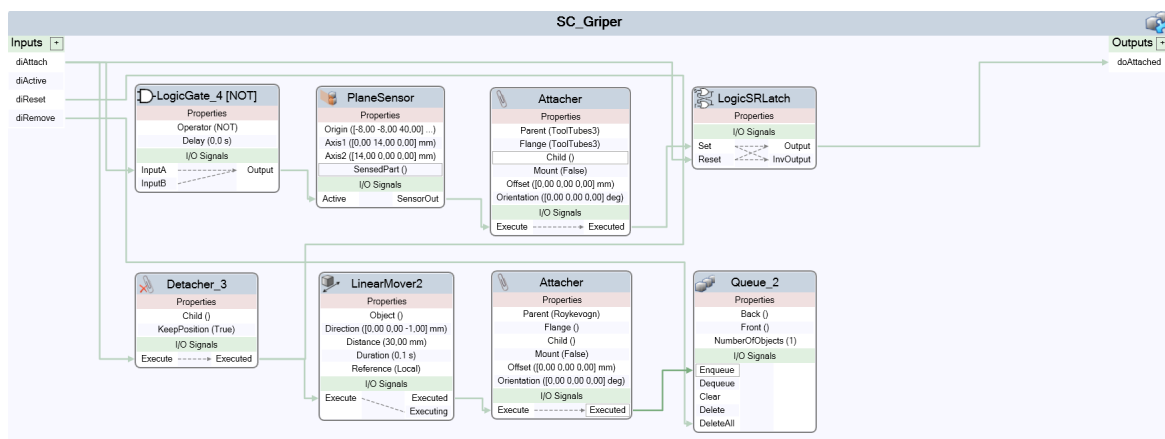
har kort avstand til røykevognens bærende struktur. For å unngå kollisjon mellom vogn og verktøy roteres verktøyet 30° .

For å unngå store svingninger på pølsene ved forflytning er akselerasjonen redusert til 2 m/s^2 . Denne begrensningen deaktiveres for robotbevegelser uten pølser. Hvorvidt dette er tilstrekkelig må undersøkes ved å utføre en fullskala test av konseptet.

Bevegelser av rondell og griper samt avlesing av posisjon for rondell, hylser på griper og magasin for røykespyd utføres ved hjelp av Rapid. Rapidkoden for ordinær og reversert linje er identisk, med unntak av enkelte fortegensendringer. Ved å definere et fåtall robtargets og benytte offset fra disse for å bestemme posisjonene som er nødvendig for forflytning er det enklere å overføre programmet til flere roboter ved en fremtidig utvidelse av anlegget.

3.5.3 Smart Components

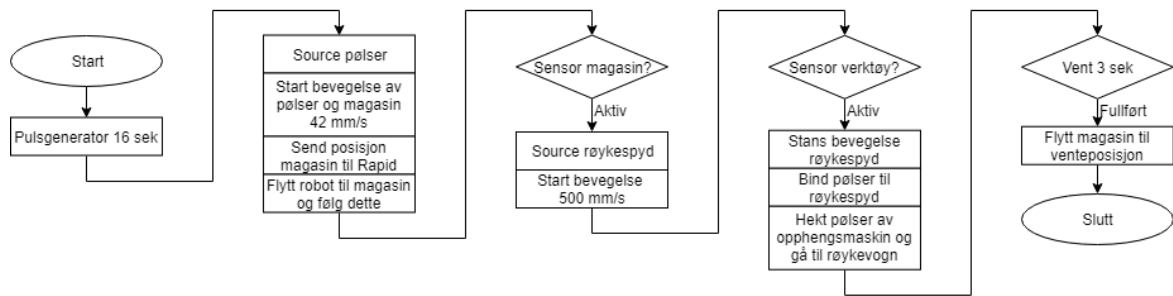
Funksjonen Smart Components omtalt i kapittel 2.6 er benyttet for å gi tilknyttet utstyr virkelighetstro egenskaper i simuleringen. Figur 3.9 viser et utdrag av elementene som er nødvendig for å simulere verktøyet som benyttes av roboten.



Figur 3.9. Smart Component for robotverktøy. Konstruert i RobotStudio [3]

Verktøyet aktiveres av inngang `diAttach`, en plansensor registrerer at røykespydet er riktig plassert i verktøyet, og bindes fast ved hjelp av en `Attacher` før utgang `doAttached` blir satt. Bindingen sørger for at røykespydet forflyttes med verktøyet som om det var limt fast. Ved deaktivering av `diAttach` sørger `Detacher` for at bindingen til røykespydet opphører, videre benyttes `LinearMover` for å simulere gravitasjonen som trekker røykespydet ned i riktig rom i vognen før den bindes til `Queue`, en virtuell gruppe av røykespyd som fjernes fra simuleringen med inngang `diRemove` når røykevognen er full.

Figur 3.10 viser arbeidsflyten for Smart Componenten som styrer alle funksjoner for opphengsmaskinen og magasinet for røykespyd. Det er gjort enkelte forenklinger ved konstruk-



Figur 3.10. Smart Component for opphengsmaskin og magasin

sjonen som at nye pølser ankommer med 16 s intervall og at hastigheten til opphengsmaskinen er konstant 42 mm/s, dette vil i praksis variere.

Det er konstruert egne Smart Componenter for bevegelse av hylsene på robotens verktøy og for bevegelsene til røykevognenes rondeller. Disse er av så enkel oppbygning at de ikke presenteres her. Smart Componentene ble først utviklet for den ordinære produksjonslinjen og ble, som med Rapidkoden, gjenbrukt for den reverserte linjen. Kommunikasjon Smart Componentene imellom og mot parametere i Rapid skjer på samme måte som ved en fysisk installasjon.

3.5.4 Simulering

Simulering er gjennomført i RobotStudio ved å kjøre robotenes bevegelser og tilhørende Smart Componenter. For å verifisere at robotens verktøy ikke kommer i kontakt med røykevogn, magasin, opphengsmaskin eller annet utstyr er kollisjonsdeteksjon aktivert for disse komponentene.

Simuleringen er utformet med to roboter, implementering av flere har ingen nytteverdi foruten det rent visuelle. Ved tilførsel av komplisert grafikk som 3D-modellene fra Vemag og flere roboter stilles høyere krav til grafikkort og CPU i datamaskinen som simuleringen utføres på. Det har derfor vært nødvendig å låne stasjonær datamaskin ved RobotNorge og UiS for å utføre disse.

Simuleringen er logget som video direkte fra RobotStudio. Denne er lastet opp og kan spilles av på videodelingsnettstedet YouTube ved å følge [denne linken](#).

3.5.5 SafeMove

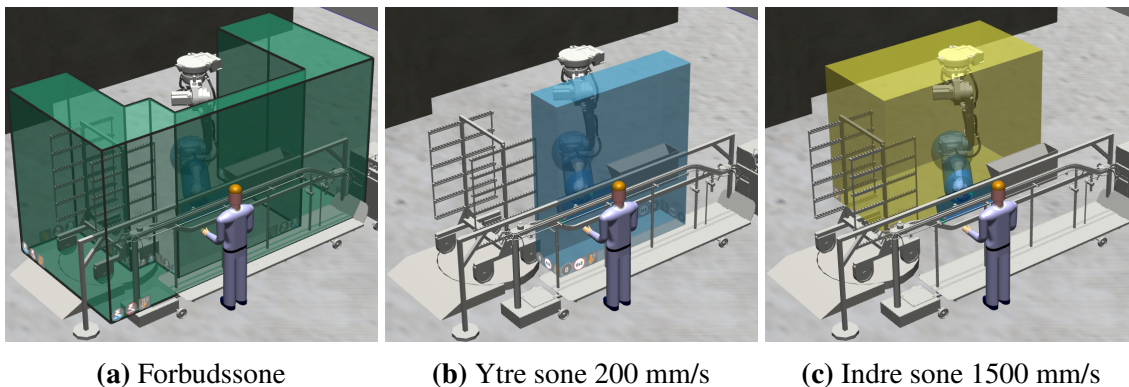
SafeMove er benyttet for å implementere sikkerhetsavstandene som beskrevet i kapittel 3.6. Arbeidet med løsningen som kan sees av figur 3.11 er utført parallelt med utregning av sikkerhetsavstand ettersom den nødvendige størrelsen på sonene endrer seg med hastighetsbegrensningene til roboten og valgte sensorer.

Forbudssonen vist av figur 3.11a representerer området roboten er nektet adgang. Sikkerhetstiltakene installeres i ytre del av denne. Den smaleste delen som skiller roboten fra operatøren er grunnet opphengsmaskinens utforming begrenset til 340 mm. Områdene på venstre og høyre side i bildet er hhv. 900 mm og 1000 mm.

Den ytre sonen følger hele lengden til opphengsmaskinen hvor roboten kan hente nye pølser og er 550 mm bred. Denne bredden kan justeres, men vil føre til økte syklustider desto mer den økes. Hastighetsbegrensningen er her satt til 200 mm/s. Sammenlagt sikkerhetsavstand mellom operatør og indre sone er i denne løsningen 890 mm.

Den indre sonen omfatter halvdelen av vognen som til enhver tid skal fylles og strekker seg langs hele lengden til opphengsmaskinen. Hastigheten er her begrenset til 1500 mm/s

SafeMove konfigureres av leverandøren av den robotiserte løsningen og er sikret mot senere endringer av kunde eller en tredjepart. Det utstedes en garanti for begrensningene som er implementert i roboten.



Figur 3.11. Soner for SafeMove. Utviklet i RobotStudio [3]

3.6 Sikkerhetsavstand

For å innfri de krav som er satt til sikkerhetsavstand i kapittel 3.5.5 er det foretatt beregninger for sensorene beskrevet i kapittel 2.5. Sonene kan sikres ved hjelp av en kombinasjon av sensorer. For siden som grenser mot opphengsmaskinen er det hensiktsmessig å benytte én sensor som sikrer bevegelser inn i både ytre og videre inn i indre sone. Denne må derfor overholde kravet for 340 mm ved 200 mm/s og 890 mm ved 1500 mm/s.

Data for de ulike typene sensorer er hentet fra produktspesifikasjonen for modeller som kan egne seg for denne typen installasjon. Disse har høy motstandsdyktighet mot vanninntrengning hvilket er nødvendig ved vask av lokalet, og er konstruert med tanke på installasjon i næringsmiddelindustrien. De valgte modellene er som følger:

Lysgitter	Sick C4C-EB10510A10000 [22]
3D-kamera	Pilz SafetyEYE [21]
Laserscanner	Sick S3000 Safety laser scanner [23]
Lysbom	Sick M4C-EB04300A10 [24]

Stopptidene for roboten er hentet fra produktspesifikasjonen for ABBs industrielle roboter, hvor det er utført fysiske tester med nødstopp og kontrollert stopp for ulike laster og utslag på robotenes ledd. Dataene presentert i tabell 3.1 representerer kontrollert stopp ved full last og leddutslag tilsvarende de som forekommer i denne robotiserte løsningen. Stopptidene er oppgitt for robotens tre første akser, og det er i beregningene tatt utgangspunkt i den største av disse. Den oppgitte tiden differensierer ikke reaksjonstiden til systemet T_{rrob} og stopptiden til roboten T_s , det er derfor tatt et anslag på 0,050 s for førstnevnte.

Tabell 3.1. Stopptider ABB IRB 4600 hentet fra produktspesifikasjon [2, kap. 13]

	200 mm/s	1500 mm/s
Akse 1 [s]	0,175	0,400
Akse 2 [s]	0,175	0,320
Akse 3 [s]	0,160	0,250
$T_{rrob} + T_s$ [s]	0,175	0,400
T_{rrob} [s]	0,050	0,050
T_s [s]	0,125	0,350

Beregningene presentert nedenfor er utført for lysgitter ved den ytre sonen. Tilsvarende beregninger er utført for samtlige sensorer og begge soner, med unntak av lysbom som ikke egner seg ved ytre sone grunnet dårlig deteksjonsevne d .

v_h	1600 mm/s iht. gjeldende regelverk [16, 5.5.4.2.3]
T_r	0,015 s for lysgitter, 0,050 s for robot
$v_s(t)$	200 mm/s konstant deakselerasjon
Z_r	0,8 mm iht. håndbok for ABB IRB 4600 [1, 1.4.3]

$$\begin{aligned}
 S_h &= \int_{t_0}^{t_0+T_r+T_s} v_h(t) dt & S_r &= \int_{t_0}^{t_0+T_r} v_r(t) dt \\
 &= v_h \cdot (T_r + T_s) & &= v_r \cdot T_r \\
 &= 1600 \cdot (0,015 + 0,050 + 0,125) & &= 200 \cdot (0,015 + 0,050) \\
 &= 304 \text{ mm} & &= 13 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_s &= \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt & C &= 8(d - 14) \\
 &= \int_0^{T_s} 200 \cdot \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) dt & &= 8(14 - 14) \\
 &= \int_0^{0,125} 200 \cdot \left(1 - \frac{t}{0,125}\right) dt & &= 0 \text{ mm} \\
 &= 13 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_p(t_0) &= S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \\
 &= 304 + 13 + 13 + 0 + 0 + 0,8 \\
 &= 330 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Tabell 3.2 viser beregninger av minste sikkerhetsavstand de ulike sensorene kan nyttiggjøres ved. Det er tatt utgangspunkt i at laserscanneren må monteres vertikalt ved opphengsmaskinen for å registrere bevegelser i overkroppen til operatøren og horisontalt for den indre sonen for å kunne dekke hele området.

Som det kan sees av tabellen vil bare et finmasket lysgitter overholde sikkerhetskravene som er stilt til systemet. En laserscanner kan i teorien benyttes for området ved røykevognen dersom sonen utvides, men vil i praksis ha store dødsoner grunnet røykevognens tilstedeværelse. Det største bidraget til laserscannerens sikkerhetsavstand er rotasjonshastigheten til laseren som gir stort utslag i reaksjonstid T_s og måletoleranse Z_d . Reaksjonstid er en

stor svakhet også i 3D-kamera, som må analysere bilder fortløpende. Dette har trolig større potensiale for maskineri med lavere hastigheter. Dersom 3D-kamera hadde oppfylt kravene til sikkerhetsavstand ville det vært nødvendig med supplerende sensorer under opphengsmaskinen ettersom denne skaper en lang dødsone. Lysbom kan ikke benyttes i denne løsningen ettersom operatøren har mulighet til å strekke hele armen inn i sonen før systemet reagerer, hvilket kan sees av inntrengningsdistansen C .

Tabell 3.2. Beregnet sikkerhetsavstand for utvalgt utstyr

	Hastighet 200 mm/s			Hastighet 1500 mm/s			
	Lysgitter	Kamera	Scanner	Lysgitter	Kamera	Scanner	Lysbom
$T_{rsensor}$ [s]	0,015	0,175	0,030	0,015	0,175	0,030	0,020
d [mm]	14	40	40	14	40	70	300
Z_d [mm]	0	120	70	0	120	70	0
T_{rrob} [s]	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
T_s [s]	0,125	0,125	0,125	0,350	0,350	0,350	0,350
Z_r [mm]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
S_h [mm]	304	560	328	664	920	688	672
S_r [mm]	13	45	16	98	338	120	105
S_s [mm]	13	13	13	94	94	94	94
C [mm]	0	208	208	0	208	208	850
S_p [mm]	330	946	635	856	1680	1181	1722

4 Tester og resultat

Denne delen av avhandlingen beskriver testene som er utført for å verifisere at den robotiserte løsningen er gjennomførbar, og inkluderer også resultatene fra disse. Testene er i sin helhet utført ved hjelp av simulering i RobotStudio.

Testene presenterer minimal, maksimal og gjennomsnittlig syklustid samt lokasjonene i røykevognen tilknyttet disse. Syklustid er skaffet til veie ved hjelp av tidtakingsfunksjon i Rapid. Tiden startes fra venteposisjon ved opphengsmaskinen når signal om nye pølser er mottatt og stanses når roboten er tilbake i venteposisjonen. Tiden roboten er stasjonær er dermed ikke medregnet.

Etttersom det er store variasjoner i avstand for forflytning til de ulike posisjonene i røykevognen er samtlige syklustider logget sammen med sin respektive lokasjon. Lokasjonen spesifiseres ved to tall, hvorav første er hyllenummer fra nederst til øverst (1-6) og andre er posisjon i hyllen fra innerst til ytterst (1-10).

Det presenteres to sett med syklustider, betegnet ordinær og reversert. Den endelige planløsningen beskrevet i kapittel 3.1.5 innebærer at rotasjonsretningen på annen hver opphengsmaskin må reverseres. Grunnet opphengsmaskinens utforming innebærer dette at alle posisjoner er 300 mm høyere i den reverserte utformingen.

4.1 Test av konsept

Testen av konseptet er gjennomført med alle begrensninger som forutsettes for en fysisk installasjon. Ved forflytning av pølser er akselerasjon begrenset til 2 m/s^2 , hastighet er nedsatt til hhv. 200 mm/s i nærheten av operatøren og 1500 mm/s i den indre sonen. SafeMove er aktivert for å verifisere at hastighetsbegrensningene overholdes, og kollisjonsdeteksjon mellom robotens verktøy og omkringliggende utstyr er aktivert.

Testresultatene som fremkommer av tabell 4.1 viser at de maksimale syklustidene er innenfor kravet på 15,46 s for røkt kjøttpølse som kan leses av tabell 2.1. Syklustidene viser at hylle 2 er representert som den mest tidkrevende hyllen, og hylle 5 som minst tidkrevende,

dog med forskjellige lokasjoner i hylle. Dette viser at det er marginal forskjell i syklustid på de omkringliggende rommene.

Tabell 4.1. Syklustid for konsept

	Ordinær			Reversert		
	Maks	Min	Gj.snitt	Maks	Min	Gj.snitt
Tid [s]	15,24	13,76	14,43	15,45	13,79	14,62
Lokasjon	2.9	5.7	-	2.1	5.8	-

4.2 Test av ikke-kollaborativt løsning

Testen av ikke-kollaborativ løsning er gjennomført ved simulering av forholdene ved en inngjerdet robotcelle. Det settes forutsetninger om at gjerdet er utformet iht. standardene beskrevet i kapittel 2.5.5 slik at ingen kroppsdel kan entre cellen. Roboten har i denne alternative løsningen redusert hastighet til 1500 mm/s og akselerasjon til 2 m/s² ved forflytning av pølser som i testen beskrevet i kapittel 4.1, disse opphører derimot ved forflytning av tomt verktøy. Foruten endringene i sikkerhetstiltakene er simuleringsmiljøet uforandret.

Testresultatene av tabell 4.2 viser reduserte syklustider i forhold til tabell 4.1 i størrelsesorden 32% for ordinær produksjonslinje og 30% for reversert versjon.

Tabell 4.2. Syklustid for ikke-kollaborativ løsning

	Ordinær			Reversert		
	Maks	Min	Gj.snitt	Maks	Min	Gj.snitt
Tid [s]	10,64	9,15	9,82	11,00	9,31	10,14
Lokasjon	2.1	5.8	-	2.1	5.9	-

5 Diskusjon

Gjennom denne avhandlingen er det fremskaffet informasjon for at det av de tre mulige metodene for kollaborativ implementasjon kan én benyttes for denne problemstillingen. Metoden med effekt- og kraftbegrensning ble forkastet ettersom ingen kollaborative roboter har tilfredsstillende kapslingsgrad for implementasjon i næringsmiddel miljø. Dersom dette kommer på markedet i fremtiden må det tas en grundig risikovurdering dersom den skal benyttes i kombinasjon med skarpe objekter. Metoden med hastighet- og avstandsovervåkning lar seg ikke gjennomføre nå grunnet lang reaksjonstid for kamerasystemet. Systemet vil mest sannsynlig bli raskere dersom en kraftigere datamaskin blir benyttet, metoden kan dermed bli aktuell i fremtiden.

Den kollaborative løsningen som er presentert benytter metoden sikkerhetsklassifisert kontrollert stopp med finmasket lysgitter som sensor. Sammenlignet med en konvensjonell robotcelle letter denne løsningen renholdet og gjør det raskere å gjøre utbedringer dersom det skulle oppstå feil med robotens arbeide. Begge løsninger viser lovende resultater i simuleringen. Den kollaborative løsningen overholder kravet til syklustid marginalt og den konvensjonelle løsningen gir muligheter for produksjonsøkning. Det må gjennomføres fullskala tester før en eventuell installasjon finner sted.

Som beskrevet innledningsvis er kapasiteten til Handtmann AST 340 6 røykespyd pr minutt. Den konvensjonelle løsningen i denne avhandlingen har tilsvarende syklustid, hhv. 9,82 s og 10,14 s i gjennomsnitt for ordinær og reversert produksjonslinje. Arealforbruket for AST 340 er 55 m² mot den foreslåtte løsningens 9 m² per produksjonslinje.

For at prosjektet skal kunne lønne seg for næringsmiddelaktøren er det satt som krav at investeringen skal kunne inntjenes i løpet av tre år. Det jobbes to skift ved hver produksjonslinje, hvilket betyr at robotisering av én linje vil gjøre to operatører overflødige. Lønnskostnadene per operatør er i dag kr 650 000 for dagskift og 30% mer for kveldsskift, hvilket utgjør kr 1 495 000 i årlige lønnskostnader per produksjonslinje.

Tabell 5.1. Grovt prisestimat

	Kollaborativ	Inngjerdet
IRB 4600-45/205	695 000	695 000
Verktøy	170 000	170 000
Vernedrakt	145 000	145 000
Opphengsstruktur	250 000	250 000
Rondell	285 000	285 000
Magasin	195 000	195 000
Lysgittere og SafeMove	435 000	-
Lysgitter og gjerde	-	115 000
Installasjon	70 000	70 000
Prosjektledelse	140 000	140 000
SUM	2 385 000	2 065 000
Inntjeningsstid	20 md.	17 md.

Prisene i tabell 5.1 er et grovt overslag utformet i samarbeid med salgssingeniør hos RobotNorge, men fullt ut illustrerende for lønnsomheten til prosjektet. Ved valg av kollaborativ løsning vil investeringen tjenes inn i løpet av 20 md., ikke medregnet tapt produksjonstid under installeringen eller drift- og vedlikeholdskostnader. Pris for lysgittere og SafeMove er for to linjer satt sammen til én celle, denne prisen vil være tilnærmet uendret dersom det velges å bare robotisere én linje.

6 Konklusjon og videre arbeid

Det har i arbeidet med denne avhandlingen blitt utarbeidet to forslag til robotiserte løsninger for håndtering av pølser på røykespyd. Foruten sikkerhetssystemene som benyttes er løsningene identiske, hvorav den ene er kollaborativ, sikret med finmaskede lysgitter og den andre er en konvensjonell inngjerdet variant.

Simuleringene indikerer at begge løsningene overholder krav til syklustid, dog med veldig ulik margin. Hvilken av disse næringsmiddelaktøren ønsker å implementere avhenger av hvorvidt enkelt renhold eller mulighet for økt produksjon er den avgjørende faktor. Ettersom løsningene er tilnærmet like er det mulig å installere den ene varianten, for senere å bytte sikkerhetssystem dersom behovet skulle endre seg.

Avhandlingen har vist at det er mulig å implementere en sikker kollaborativ robotisert løsning av problemstillingen. Det gjenstår dog en del arbeid før installasjon kan finne sted. Robotens verktøy og magasin for røykespyd med lineærføring må videreutvikles, likeledes må programkoden tilpasses for bruk på fysisk robot og et brukergrensesnitt for robotens håndholdte betjeningspanel må utvikles.


Bibliografi

- [1] ABB AB. Product manual IRB 4600, 2017.
- [2] ABB AB. Product specification, Robot stopping distances according to ISO 10218-1, 2017.
- [3] ABB AB. Robotstudio, 21.05.2018. URL <http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio>.
- [4] ABB AB. Industrial Robots, 22.05.2018. URL <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots>.
- [5] RobotNorge AS. Forside, 04.05.2018. URL <https://robotnorge.no/>.
- [6] ASP. Robot protective covers - Food industry, 25.05.2018. URL <http://www.asp-protection.eu/page56-food-industry.html>.
- [7] Autodesk Inc. Inventor, 23.05.2018. URL <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>.
- [8] Handtmann GmbH. AST 340 Automatic smoke stick transfer unit, 04.05.2018. URL <https://www.handtmann.de/en/filling-and-portioning-systems/products/functions/automating/ast-340-smoke-stick-transfer-unit/>.
- [9] Handtmann Inc. Ast 340, 10.05.2018. URL <http://www.handtmann.us/meat/automatic-hanging-linking-systems/ast-340>.
- [10] Svein Morten Hauge. Analyse og effektivisering av pakkelinje for rundost. mathesis, Universitetet i Stavanger, 2016.
- [11] International Organization of Standardization. ISO 14159:2002 Safety of machinery, Hygiene requirements for the design of machinery, 2002.
- [12] International Organization of Standardization. ISO 13857:2008 Safety of machinery, Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs, 2008.
- [13] International Organization of Standardization. ISO 13855:2010 Safety of machinery, Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body, 2010.
- [14] International Organization of Standardization. ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices, Safety requirements for industrial robots, Part 1: Robots, 2011.

-
- [15] International Organization of Standardization. ISO 10218-2:2011 Robots and robotic devices, Safety requirements for industrial robots, Part 2: Robot systems and integration, 2011.
- [16] International Organization of Standardization. ISO/TS 15066:2016 Robots and robotic devices - Collaborative robots, 2016.
- [17] Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG. DE 50 2007 001 246.7 Rauchstockgreifer / Smoking rod gripper, 2007. URL <https://register.dpma.de/DPMAreister/pat/register?AKZ=E070105242>.
- [18] Pilz GmbH & Co. KG. The Safety Compendium, 2017. URL https://www.pilz.com/mam/pilz/content/editors_mm/safety_compendium_en_2017_12_low.pdf.
- [19] Marel. The perfect linker, 2017. URL https://marel.com/files/products/brochures/TFP-brochures-request/linker/TFP_linker_en.pdf?ind=further.
- [20] Oxford Dictionary. Cobot. 06.02.2018. URL <https://en.oxforddictionaries.com/definition/us/cobot>.
- [21] Pilz GmbH & Co. SafetyEYE Operating Manual, 2015. URL <https://www.pilz.com/en-GB/eshop/00106002207042/SafetyEYE-Safe-camera-system>.
- [22] Sick AG. C4C-EB10510A10000, 05.06.2018. URL <https://www.sick.com/ag/en/opto-electronic-protective-devices/safety-light-curtains/detec/c4c-eb10510a10000/pp534670>.
- [23] Sick AG. Operating instructions S3000 Safety laser scanner, 2016. URL https://www.sick.com/media/docs/3/63/863/Operating_instructions_S3000_Safety_Laser_scanner_en_IM0011863.PDF.
- [24] Sick AG. Product information deTec IP69K, 2017. URL https://sick-virginia.data.continuum.net/media/docs/4/24/724/Product_information_deTec_IP69K_deTem_IP69K_en_IM0074724.PDF.
- [25] Spong. *Robot Modeling and Control*. 2005. ISBN 0471649902.
- [26] Vemag GmbH. Hanging machine AH212, 07.05.2018. URL <http://www.vemag.de/en/products/sausage-lines/hanging-machine-ah-212/>.
- [27] Vemag GmbH. Vacuum filler HP10E, 07.05.2018. URL <http://www.vemag.de/en/products/vacuum-filler/vacuum-filler-hp10e/>.
- [28] Vemag GmbH. Length Portioning Machine LPG208 Servo, 07.05.2018. URL <http://www.vemag.de/en/products/sausage-lines/length-portioning-machine-lpg208-servo/>.
- [29] Vemag GmbH. Sausage lines, 08.05.2018. URL <http://www.vemag.de/en/products/sausage-lines/>.
- [30] YouTube. Handtmann AST 340, 23.05.2018. URL <https://www.youtube.com/watch?v=beHnGjGKeCM>.

A Vedlegg

Video av simulert løøsning på YouTube kan sees ved å følge linken under:
<https://youtu.be/7U8pO-VmBRs>

Ved å dobbeltklikke på tegnestiften åpnes: 

- Rapidkode
- Video av simuleringen
- 3D-modell av røykevogn, robotverktøy og magasin