Optimering af laserskæringshastighed

- baseret på kvalitetsanalyse af Grundfos' statorlamel og en empirisk procesmodel

KANDIDATSPECIALE 2013
AALBORG UNIVERSITET
VIRKSOMHEDSTEKNOLOGI
DEN 4. JUNI 2013

Titel: Optimering af laserskæringshastighed - baseret på kvalitetsanalyse af Grundfos' statorlamel og en empirisk procesmodel
Semester: 10.
Semester tema: Kandidatspeciale
Projektperiode: 1. feb. - 4. jun. 2013
ECTS: 30 point
Vejleder: Morten Kristiansen
Projektgruppe: VT4-29a
Gruppemedlemmer:

Emil Krabbe Nielsen

Lasse Juul Rud Hansen

Oplagstal: 2 stk.
Sidetal: 99 sider
Bilag: 35 sider, samt DVD

Synopsis:

Grundfos ønsker at være i stand til at laserskære statorlameller med højere skærehastig og en kvalitet tilsvarende stanseprocessen mhp. de magnetiske egenskaber. En stanset og laserskåret statorlamel er analyseret, hvor laserskæring resulterede i den bedste kvalitet, og ingen forskel i de magnetiske egenskaber kunne påvises. En række proces- og kvalitetsparametre blev udvalgt og en database for laserskæringsprocessen blev bygget på baggrund af bl.a. faktorforsøg.
Et neuralt netværk blev trænet på databasen som en empirisk procesmodel. Denne model udviste samme egenskaber for laserskæringsprocessen, som en variansanalyse af databasen. Modellen repræsenterer laserskæringsprocessen på samme vis som anden publiceret forskning. En genetisk algoritme benyttes til at optimere skærehastigheden med 1160 % og samtidig opnå en bedre kvalitet end ved stansning. Optimeringen optimerede procesparametrene og gjorde brug af procesmodellen til at evaluere hvorvidt kvalitetsparametrene var på niveau med stansekvaliteten.

Ved at underskrive dette dokument bekræfter hvert enkelt gruppemedlem, at alle har deltaget lige i projektarbejdet, og at alle således hæfter kollektivt for rapportens indhold.

AALBORG UNIVERSITY
STUDENT REPORT
Studienævnet for Industri og Global Forretningsudvikling
Fibigerstræde 16
DK 9220 Aalborg Øst
Tel +45 99 40 93 09 Fax +45 98 15 16 75
swe@me.aau.dk http://www.industri.aau.dk/

Forord

Denne rapport er skrevet af Lasse Jul Ruud Hansen og Emil Krabbe Nielsen, som kandidatspeciale i forbindelse med 4. semester af kandidaten Virksomhedsteknologi. Rapporten er skrevet i løbet af forårs semestret i 2013 ved Aalborg Universitet, Aalborg, Danmark. Rapportens indhold er udformet i samspil med Grundfos A/S.

Porjektet er dokumenteret ved en rapport, en litteraturliste, et bilag og en vedlagt dvd. Den vedlagte dvd vil indeholde indsamlet data, skrevet g- og pythonkode, arbejdstegninger og datablade for anvendt udstyr. Yderligere indeholder den en elektronisk version af rapporten. Rapporten er opdelt i to dele, den ene omhandlende forberedelse til og udførelse af laserskæringsforsøg samt analyse af resultater. Den anden del omhandler en anvendelse af disse resultater.

Navne på rapportens figurer, tabeller og formler er angivet numerisk og fortløbende som A.B, hvor A er kapitel nummer, og B er figur-, tabel- eller formelnummer. Referencer til formler er noteret i parenteser, mens referencer til figurer og tabeller er foretaget foruden. Hvis ingen kildehenvisning er anvist i den tilhørende figurtekst, er figuren tegnet af rapportens forfattere. Forkortelser er, efter det fulde ord eller navn, introduceret i parenteser, første gang det forkortede ord præsenteres. Uddybende materiale der er refereret til, kan findes i bilag, eller på den vedlagte DVD. En indholdfortegnelse for DVD'ens indhold kan ligeledes findes i bilag G.

Kildehenvisninger er præsenteret i teksten som [Efternavn, Årstal], hvor der ved flere forfattere er henvist til begge forfatteres efternavne. Ved tre eller flere forfattere er den kilden præsenteret ved korresponderende forfatters efternavn med flere [Efternavn et al., Årstal]. Kildehenvisningerne refererer til litteraturlisten, hvor disse er opstillet i alfabetisk rækkefølge. I Litteraturlisten er bøger angivet ved *Forfatter. Titel. Forlag, udgivelsesår, udgave, ISBN*, og artikler som *Journal. Titel. Forfatter. Udgivelsesår*.

Indhold

1 Indledning **1**

1.1 Projektformål 3

1.2 Projektindhold 3

2 Problemformulering **5**

I Database **7**

3 Design af forsøgsmetoder **9**

3.1 Definering af den givne problemstilling 9

3.2 Valg af procesparametre 10

3.3 Valg af måleparametre 10

3.4 Valg af eksperimentelt design 10

3.5 Udførelse af eksperimentet 11

3.6 Statistisk analyse af data 11

3.7 Konklusion og opfølgning 11

4 Procesparametre **13**

4.1 Laserskæring 13

4.2 Procesparametre 15

4.3 Kvantifisering 18

5 Måleparametre og målemetoder **21**

5.1 Skærekvalitet 21

5.2 Måling af måleparametre 25

6 Eksperimentelle forsøg **35**

6.1 Laseropsætning 35

6.2 Arbejdsemne 38

6.3 Laserskæring 39

6.4 Støbning, slibning og polering 39

6.5 Opmåling 42

6.6 Database . . . 42
6.7 Indledende forsøg . . . 43
6.8 Eksperimentelt design . . . 44

7 Statistisk analyse af data **49**
7.1 Hovedeffekter . . . 49
7.2 Vekselvirkninger . . . 53

8 Analyse af Grundfos' statorlamel **57**

9 Diskussion og delkonklusion **63**
9.1 Procesparametre . . . 63
9.2 Måleparametre og målemetoder . . . 63
9.3 Eksperimentelle forsøg . . . 64
9.4 Statistisk analyse af data . . . 64
9.5 Analyse af Grundfos' statorlamel . . . 65

II Optimering og opbygning af procesmodel **67**

10 Valg af procesmodel og optimeringsmetode **69**
10.1 Parameterrelation . . . 70
10.2 Ukonventionel optimering . . . 70
10.3 Hybridoptimering . . . 71

11 Empirisk procesmodel **73**
11.1 Neuralt netværk . . . 73
11.2 Lignende anvendelser . . . 74
11.3 Netværksarkitektur . . . 74
11.4 Virkningsgrad . . . 77
11.5 Eftervisning . . . 79

12 Optimering af skærehastighed **83**
12.1 Genetisk algoritme . . . 83
12.2 Virkemåde . . . 84
12.3 Optimering . . . 84
12.4 Resultater . . . 87

13 Diskussion og delkonklusion **89**

III Afrunding **91**

14 Konklusion **93**

14.1 Opbygning af database 93
14.2 Parameterrelatering og -optimering 93

15 Resume **95**

IV Litteraturliste **97**

Litteraturliste **99**

V Bilag **1**

A Lasere **5**

B Systemdynamik **7**

C Tilslutning af laser **13**
C.1 Tilslutning 13
C.2 Opsætning 14
C.3 Laser kalibrering 14

D Anova **19**
D.1 Vekselvirkninger 20

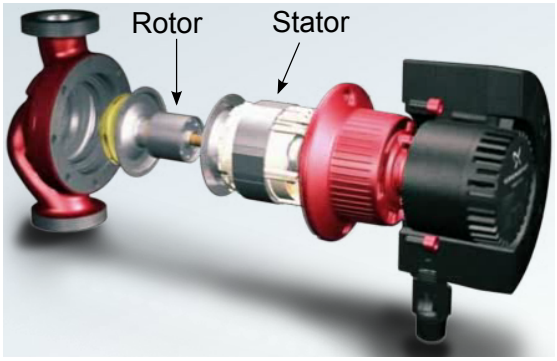
E Billedeanalyse **27**
E.1 Skærebreddeopmålingsprogram 27

F Arbejdstegning for stator **33**

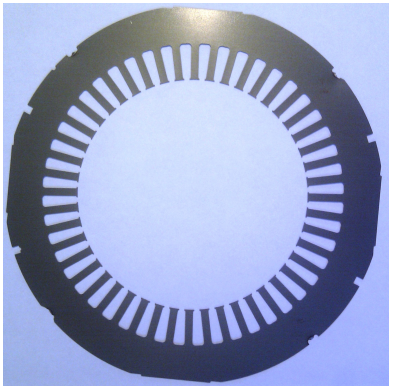
G DVD index **35**

1 Indledning

Grundfos er i dag en af verdens største pumpeproducenter, med fabrikker over hele verden. Grundfos er en virksomhed med et stort fokus på kvalitet, og har derved også nogle af verdens mest effektive pumper. En af hemmelighederne bag Grundfos' høje effekt på deres pumper, er deres elmotor, som er en af de komponenter de selv designer og producerer. En af de centrale dele i en elmotor er statoren og rotoren, da kvaliteten af disse dele afspejles direkte i motorens effekt.



Figur 1.1: *Udsnit af en Grundfos pumpe med motor og tilhørende rotor og stator.*



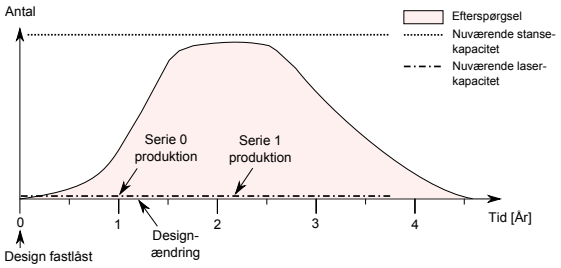
Figur 1.2: *Statorlamel benyttet i Grundfos' motorer.*

En rotor og stator består af en stak sammensvejste rotor- og statorlameller, hvor den grundlæggende form minder om den på figur 1.2. Grundfos får i dag stanset, deres rotor- og statorlameller ved en underleverandør [Jens V. Boll, personlig samtale]. I projektet fokuseres fremover kun på statorlamellen. Ved at anvende stansning, opnås en høj produktionskapacitet, og dette kan være nødvendigt for at følge med efterspørgslen. Ulempen ved at anvende stansning er de tilfælde, hvor efterspørgslen er lav og den høje produktionskapacitet ikke kan udnyttes. En anden ulempe ved stansning er, at processen er relativt ufleksibel. Dette kan ses ved Grundfos, da de er tvunget til at fastfryse deres statordesign, et år forinden produktion af en ny motor, hvilket bl.a. skyldes underleverandøren skal have tid til at designe og fremstille stanseværktøjer. Grundfos er interesseret i at undersøge om der findes et alternativ til den nuværende produktionsmodel, der vil kunne være mere fleksibel, og stadig kunne opretholde samme kvalitet og følge med efterspørgslen [Jens V. Boll, personlig samtale].

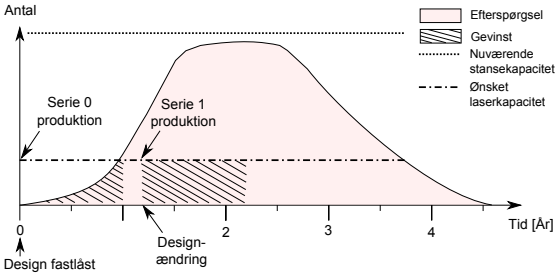
Grundfos anvender i dag laserskæring til fremstilling af prototype statorer, da de ved brug af laserskæringen kan opnå en høj fleksibilitet, og stadig opnå emnernes kvalitetskrav. Ulempen når Grundfos laserskærer prototyper er, at de kører med en konstant skærehastighed på 1400 mm/min, fordi det ikke er muligt at have variable procesparametre på deres laserskærecelle [Jens V. Boll, personlig samtale]. Den lave skærehastighed vil nemt kunne øges, ved at køre med dynamiske procesparametre, og kunne derved måske være

egnet i en fremtidig produktion. Grundfos er interesserede i at undersøge om laserskæring kunne være et alternativ til stansning, eller kan kombineres med stansning [Jens V. Boll, personlig samtale]. Ved at kombinere processerne, ville laserskæringen kunne anvendes i en opstartsfase for at give fleksibilitet og hvis efterspørgslen stiger, vil en indkørsel af stansning fra underleverandøren være mulig, for at imødekomme en højere efterspørgsel. Ved denne produktionsstruktur, vil det være muligt at ændre i statordesignet, uden de store konsekvenser, også efter den første produktion er startet.

Hvis laserskæringshastigheden kan øges, vil det være muligt for Grundfos at benytte laseren til produktion af prototyper, men også til produktion i den tidlige opstartsfase efter fastlåsning af rotordesignet, eller ved efterfølgende designændringer. Yderligere vil Grundfos kunne imødekomme hasteordre eller pludseligt stigende efterspørgsel, ved at supplere stansningen med laserskæring. På figur 1.3 ses den nuværende produktionsmetode med stansning og laserskæring til prototypefremstilling som fastlåser produktionen et år i forvejen. På figur 1.4 er en alternativ produktionsmetode vist hvor laserskæringskapaciteten er større, hermed vil der kunne produceres tidligere, som giver mulighed for at opfylde en efterspørgsel fra udfasning af et tidligere produkt eller vinde markedsdele ved at være tidligere på markedet. Den potentielle gevinst er skraveret på figur 1.4.



Figur 1.3: *Graf over produktivitet som funktion af tiden for den nuværende produktionsmetode.*



Figur 1.4: *Graf over produktivitet som funktion af tiden for en mere fleksibel laserskæringsproduktionsmetode.*

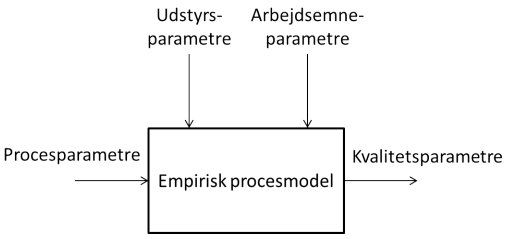
For at undersøge om denne produktionsstruktur kan være et alternativ, er Grundfos interesseret i at finde ud af hvilken skærehastighed der kan opnås, mens de geometriske tolerancer overholdes. Da laserskæring modsat stansning involverer opvarmning af statorslamellerne, er der mulighed for at de metallurgiske og magnetiske egenskaber ændres. Dette vil have betydning for motorens effektivitet, dermed ønskes som udgangspunkt mindst den samme skærekvalitet for laserskæring som ved stansning [Jens V. Boll, personlig samtale]. Både stansning og laserskæring har en effekt på de magnetiske egenskaber, som skyldes spændinger. Afhængigt af procesparametrene, har det vist sig at være muligt at opnå bedre magnetiske egenskaber ved laserskæring end stansning. Således kan både laserskæring og stansningen have størst indflydelse på de magnetiske egenskaber, og der er derfor ikke entydige resultater for hvilken proces, der bedst bevarer de magnetiske egenskaber [Moses og Loisos, 2005, Belhadj et al., 2001].

Laserskæringshastigheden skal øges, for at Grundfos har et incitement for at benytte denne i en mere fleksibel produktion. Dette skyldes den nuværende lave produktivitet ift. stansning. På baggrund af Grundfos' ønske om en større viden om laserskæring ved samme kvalitet som ved stansning, blot hurtigere end hidtil mulig, kan projektets formål beskrives.

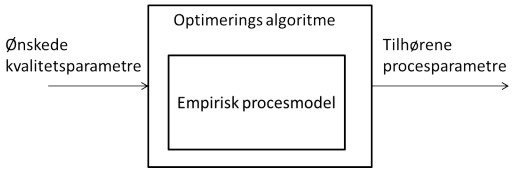
1.1 Projektformål

Laserskæring er en kompliceret forarbejdsningsproces sammenlignet med mere konventionelle forarbejdningsprocesser som f.eks. fræsning eller boring. Lasere afgiver en lysstråle typisk bestående af et højt energiniveau. Kvaliteten af strålen afhænger af mange designmæssige aspekter og indstillingsmuligheder som afhænger af fysikken der beskriver atomer, energi og lys. Ved laserskæring afhænger skærekvaliteten ikke blot af laseren, men adskillige andre procesparametre hvis effekt vekselvirker med hinanden [Steen og Mazumder, 2010].

Laserskæring er derfor en højst ulineær og kompleks proces, hvilket kan gøre det besværligt og tidskrævende at opstille en analytisk model. Alternativet er at opstille en empirisk model baseret på empiriske data. For at opbygge en database som den empiriske procesmodel kan bygges på, må en række forsøg udføres for at indsamle data dertil. Såfremt en større mængde forsøg skal udføres, bør disse planlægges omhyggeligt for at undgå tidsspilde på ændringer i udførelse eller gentagelser af forsøg. Der skal derfor struktures en effektiv dataopsamlingsmetode, mhp. at reducere den absolutte og relative målefejl samt tidsforbrug. I dette tilfælde er formålet, at opbygge en procesmodel og dermed kunne relatere procesparametrene af en laserskæring til tilhørene kvalitetsparametre, som vist på figur 1.5. Når relationen mellem procesparametre og kvalitetsparametrene er skabt, ønskes en optimal skærehastighed ud fra ønskede kvalitetsparametre. Dette kan opnås ved at anvende en optimeringsalgoritme, som vist på figur 1.6.



Figur 1.5: *Empirisk procesmodel til at finde kvaliteten ud fra procesparametrene.*



Figur 1.6: *Benyttelse af optimeringsalgoritme og procesmodel, til at finde procesparametrene til de ønskede kvalitetsparametre.*

Den optimale skærehastighed, som er en procesparameter for laserskæring, kan ud fra optimeringen og procesmodellen, findes ud fra de ønskede kvalitetsparametre. Den ønskede kvalitet vil fungere som randbetingelser for optimeringens søgeområde. Således kan optimeringen justere procesparametrene og optimere skærehastigheden, og evaluere disse ved brug af procesmodellen, for at undersøge om de overholder randbetingelserne. De ønskede kvalitetsrandbetingelser vil således være lig kvaliteten for Grundfos' stansede statorlameller.

1.2 Projektindhold

Første del af projektet har til formål at give et indblik i hvordan en stor mængde forsøg struktureres og udføres for efterfølgende at kunne indgå i en laserskæringsdatabase. Dernæst gives en forklaring af hvordan laserskæring fungerer, hvilke procesparametre som kan indstilles og hvilken betydning de har for procesforløbet og den resulterende skærekvalitet. Yderligere forklares hvorledes laserskæringskvaliteten kan kvantifiseres i henhold til internationale standarder. Den nuværende laserskærings- og stansekvalitet for en stator undersøges med henblik på at give en basis for forbedring og sammenligning.

Benyttelsen af metoderne samt forsøgsprocedurer, forsøgsopstilling og fremgangsmåder gennemgåes ligesåvel som metoder til automatisering af kvalitetsopmåling og de resultater og opmålinger som foretages. Resultaterne af forsøgene vil afslutningsvist blive analyseret og diskuteret.

Anden del af projektet vil indbefatte opbygning af en empirisk procesmodel, til relatering af proces- og kvalitetsparametre. Denne model vil efterfølgende blive verificeret statistisk og blive benyttet til at optimere skærehastigheden og skærekvaliteten ved brug af en optimeringsalgoritme.

Problemformulering

2

Formålet med projektet er, at undersøge hvorledes laserskærekvaliteten kan kvantificeres og kan opnås på samme niveau, som de af Grundfos hidtil stansede statorlameller. En database skal opbygges ud fra en række strukturerede forsøg, som skal ligge til grund for en empirisk procesmodel. Procesmodellen skal ud fra et sæt procesparametre kunne finde skærekvaliteten, således at skærehastigheden kan optimeres for modellen.

Projektets indhold er opdelt i to primære dele, den første omhandlende opbygning af databasen, planlægning af forsøg, samt en undersøgelse af laserskæringsprocessen og dens procesparametre. Den efterfølgende del omhandler relatering af procesparametre med kvaliteten, ved brug af en empirisk procesmodel, og efterfølgende optimering af skærehastigheden.

Opbygning af database

- Hvordan kvantifiseres laserskærekvaliteten for laserskæring?
- Hvordan struktureres en større mængde forsøg bedst muligt?
- Hvordan reduceres tiden brugt på opmåling af forsøgsresultater?
- Hvordan påvirker hhv. stansning og laserskæring de magnetiske egenskaber?
- Hvordan er laserskærekvaliteten sammenlignet med Grundfos' stansekvalitet?

Parameterrelatering og -optimering

- Hvordan laves en empirisk procesmodel til at opnå en bestemt skærekvalitet ud fra procesparametrene?
- Hvordan optimeres hastigheden ud fra en procesmodel?
- Hvor høj en skærehastighed er det muligt at opnå
  - når kvaliteten som minimum skal være lig den for stansning?
  - og skærehastigheden mindst skal være 1400 mm/min?
- Hvor stor er forskellen mellen Grundfos' stansekvalitet og modellens forudsagte kvalitet ved den optimerede hastighed?
- Hvilke kvalitetsmæssige forskelle er der på Grundfos' laserskæringskvalitet og kvaliteten opnået efter optimering af hastigheden?

Database

I

Design af forsøgsmetoder

3

For at være i stand til at bestemme procesparametrene ud fra en række kvalitetsparametre, skal en empirisk procesmodel opbygges. Procesmodellen skal bygges på en vidensdatabase. Denne database kan bestå af teoretisk eller empiriske viden. Den teoretiske tilgang vil resultere i en analytisk model. For simple lineære processer, er en analytisk model at foretrække, da denne vil kunne opstilles relativt hurtigt, og præcist. For komplekse ulineære processer, kan en analytisk model være tidskrævende, en dårlig tilnærmelse, og i vise tilfælde umulig at opstille [Pietro og Yao, 1992, Steen og Mazumder, 2010]. Den empiriske tilgang vil resultere i en empirisk model. Fordelen ved en empirisk model, er at denne kan opstilles uden en stor analytisk model. Ulempen er dog, at der skal indsamles empirisk data for den givne proces. Indsamling af empirisk data er tidskrævende, og kræver at man er i stand til at monitorere processen. Der findes to typer af procesmonitorering, diskret hvor der måles efter processen er gennemført, eller kontinuerlig hvor der måles under selve procesforløbet. Valg af monitorerings type, skal vælges på baggrund af målsætningen med modellen, da kvalitetsparametre ofte findes i forbindelse med slutproduktet, vil diskret monitorering være tilstrækkelig. Der er set eksempler på både diskret [Riveiro et al., 2010] og kontinuerlig [Bohrer et al., 1999] monitorering af laserskæringsprocessen.
Der findes forskellige fremgangsmåder for indsamling af empirisk data og opbygning af empiriske modeller, dog er strukturen den samme. Det er valgt at tage udgangspunkt i metoden design af eksperimenter (DOE) fremsat af Douglas C. Montgomery[Montgomery, 2013]. Når der skal foretages en omfattende mængde empiriske eksperimeter, er det vigtigt at skabe en struktur for forsøget. Dette skyldes at eksperimenter hvor forholdet mellem input- og måleparametre skal blotlægges, kan være omfattende og tidkrævende. Der opstilles og diskuteres 7 punkter for strukturering af et empirisk forsøg, som denne første del omhandlende opbygning af en database vil tage udgangspunkt i.

3.1 Definering af den givne problemstilling

For at arbejde målrettet og fokuseret er det vigtigt, at definere hvad målet med et empirisk forsøg er. For et empirisk forsøg er dette specielt vigtigt, da det kan have store konsekvenser for slutresultatet hvis fokus går tabt under de mange forsøg der skal gennemgås. Der findes mange forskellige målsætninger, i dette projekt er formålet beskrevet i kapitel 1 og 2, som kortfattet går ud på at:

"opsamle tilstrækkelig data ved færrest mulige forsøg, til opbygning af en laserskæringsdatabase, for efterfølgende at kunne relatere procesparametre med kvalitetsparametre for laserskæringsprocessen ved en empirisk procesmodel".

3.2 Valg af procesparametre

Under dette punkt er en generel procesforståelse nødvendig, for at være i stand til at definere de forskellige procesparametre. Når procesparametrene er defineret, skal intervaller for parameterværdier angives. For at dette kan lade sig gøre skal der indhentes teoretisk og empirisk viden dvs. der skal udføres en række faktorforsøg for at vide hvordan parametre vekselvirker og påvirker de givne måleparametre. Valg af procesparametre og måleparametre sker ofte parallelt, da de begge kræver faktorforsøg. Antallet af valgte procesparametre har indflydelse på mængden af information det er muligt at opnå. Mange procesparametre vil gøre det nemmere at identificere vekselvirkninger og signifikante procesparametre, men vil kræve flere forsøg og tid. Når de forskellige procesparametre er fundet, er det vigtigt at få klarlagt, hvilke der vil være designparametre, parametre der skal holdes konstante gennem eksperimentet og hvilke der må fluktuere. Ved laserskæring kunne pladetykkelsen være en parameter som holdes konstant, luftfugtigheden kunne være en fluktuerende parameter, mens skærehastighed kunne være en designparameter. Teori om hhv. laserskæringsprocessen og tilhørende procesparametre gennemgås i kapitel 4, hvor valget af procesparametre også er beskrevet.

3.3 Valg af måleparametre

Valget af måleparametre er essentielt for at et eksperiment er i stand til at give den ønskede information. Måleparametrene vælges, så de giver mest mulig data for et ønsket område, fx hvis de geometriske tolerancer efter laserskæring er af interesse, er procestiden ikke en relevant faktor at måle på. Måleparametre og procesparametre skal vælges så procesparametrene har en indflydelse på måleparametrene, for at undersøge denne sammenhæng, kan et "årsag-og-virknings"diagram anvendes. For hver måleparameter skal der vælges en målemetode, det er vigtig at overveje kalibrering, måletolerancer, og om de givne målinger vil være gentagelige. Måleparametrene som fremover benævnes kvalitetsparametre beskrives og vælges i kaptiel 5 hvor målemetoderne også er beskrevet.

3.4 Valg af eksperimentelt design

Når måleparametre og procesparametre er valgt, kan eksperimentet designes. Generelt kan design af eksperimenter opdeles i tre grupper; stokastisk søgning, systematisk søgning, og faktordesign. Stokastisk søgning er hvor tilfældige parameter værdier anvendes, systematisk søgning er hvor parameterværdier ændres udtømmende, og faktordesign er hvor de anvendte parameterværdier er udvalgt på en specifik måde. Ofte bruges Stokastisk eller systematisk søgning til at belyse randbetingelser for de enkelte faktorer, og udførsel af faktorforsøg er blot en komprimeret udgave. Faktordesign er den mest anvendte fremgangsmåde, da denne giver gode resulter på kortere tid, med færre forsøg i forhold til de to andre metoder [Montgomery, 2013]. Der vil derfor blive taget udgangspunkt i faktordesign.
Den umiddelbare logiske fremgangsmåde ved forsøgsdesign, ville være at ændre på en faktor et antal gange, og derved analysere hvordan denne påvirker systemet. Ved mere komplekse systemer vil denne metode give ringe resultater. Dette skyldes faktorer der vil have en vekselvirkning på systemet, der ikke vil blive belyst. Ved faktordesign, ændres flere faktorer af gangen, derved vil vekselvirkningen kunne ses, og samme resultater som ved at ændre på en faktor af gangen, vil kunne påvises ved at analysere dataene. Inden for faktordesign findes forskellige metoder, de tre mest anvendte er:

- Fuldt faktordesign
- Fraktions faktordesign
- Ortogonale arrays

Fuldt faktordesign benyttes til at undersøge alle kombinationer af de givne faktorer. Dette design er yderst resourcekrævende da antallet af eksperimentelle forsøg er meget højt. Fraktions faktordesign er hvor der tages en fraktion af et fuldt faktordesign, og på denne måde mindske antallet af forsøg. Fraktions faktordesign kræver større procesforståelse, da det er nødvendigt at vide for hvilke parametre antallet af forsøg kan sænkes, uden betydelige mængder af information går tabt. Ortogonale arrays går under navnet Taguchi-metoden, når omtalt i produktionssammenhæng. Metoden er en type fraktions faktordesign af høj grad, der til trods for at være en højst komprimeret fraktions forsøgstype, er i stand til at blotlægge vekselvirkninger. I afsnit 6.8 er det eksperimentelle design beskrevet.

3.5 Udførelse af eksperimentet

Når det eksperimentelle design er valgt, skal et indledende eksperiment gennemføres for at indsnævre procesparameterværdierne. Ved udførsel af eksperimentet er det vigtigt at holde fokus på opgaven, da der ellers nemt kan forekomme fejlaflæsninger, fejlindstilling af parametre eller andre menneskelig indvirkninger, der kan have stor indflydelse på resultaterne. Det indledende eksperiment og eksperimentet er beskrevet i kapitel 6.

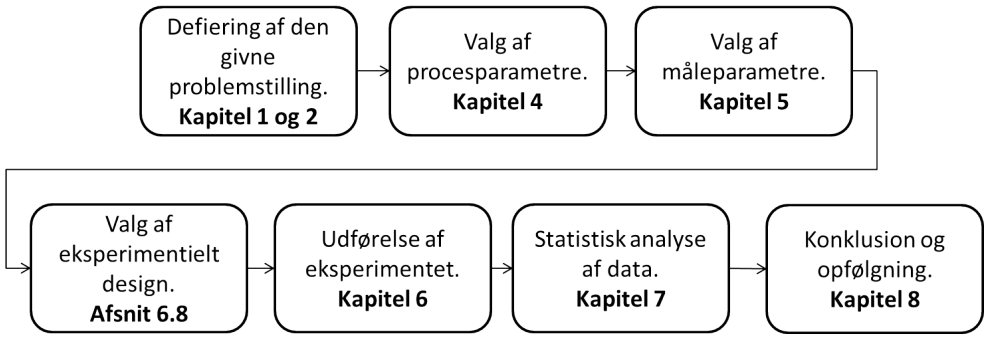
3.6 Statistisk analyse af data

Efter at de empiriske data er indsamlet, er det vigtigt at lave en statistisk analyse, for at kunne give en objektiv vurdering af resultaterne. Ved at anvende en statistisk analysemetode, opnås også en viden om kvaliteten af eksperimentet, ud fra gennemsnittet, spredningen og variansen af datasættet. En grafisk præsentation af resultaterne, kan være meget gavnlig når der skal drages en konklusion og resultaterne skal præsenteres. Den statistiske analyse er beskrevet i kapitel 7.

3.7 Konklusion og opfølgning

Når et objektivt resultat, er fundet, er det vigtigt at drage en praktisk konklusion - er resultatet som forventet? Ved at konkludere på resultaterne ses det også tydeligt om der er behov for at følge op på resultaterne, med yderlige raffinerede eksperimenter, eller om resultaterne skal replikeres for at få en bedre underbygning af en konklusion. I kapitel 9 diskuteres resultaterne og fremgangsmåde ligesåvel som der konkluderes på disse.

De 7 punkter anvendt til strukturering af et empirisk forsøg, vil blive anvendt som rød tråd gennem opbygningen af databasen. Strukturen for den første del af projektet kan se på figur 3.1.



Figur 3.1: *Oversigt over første del af projeket, opbygning af database.*

Procesparametre

4

Indledningsvist gives en kort teoretisk forklaring af laserskæring, hvor relevante betegnelser indføres. De procesparametre som har påvist betydning for skærekvaliteten beskrives, hvorved en dybere teoretisk forklaring af laserskæring gives. Der vælges hvilke procesparametre som skal holdes konstante, og hvilke der vil være designparametre. En generel beskrivelse af laseres virkemåde er givet i bilag A.

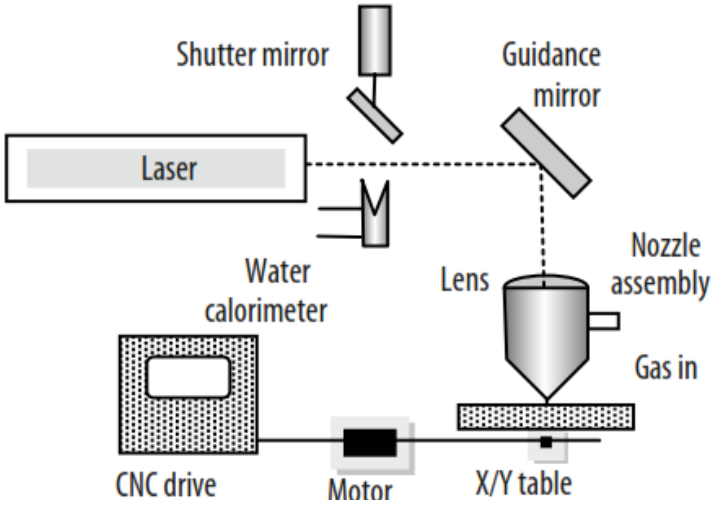
4.1 Laserskæring

Termisk skæring opdeles afhængigt af energikilden i tre kategorier, hver med samme tre underkategorier angivende for hvorledes energikilden benyttes til at skære i arbejdsemnet. Laserskæring kan foregå ved at brænde, smelte eller sublimere materiale. Andre typer af laserskæring er variationer af disse tre [DS/EN ISO 9013, 2002, Ghany og Newishy, 2005].

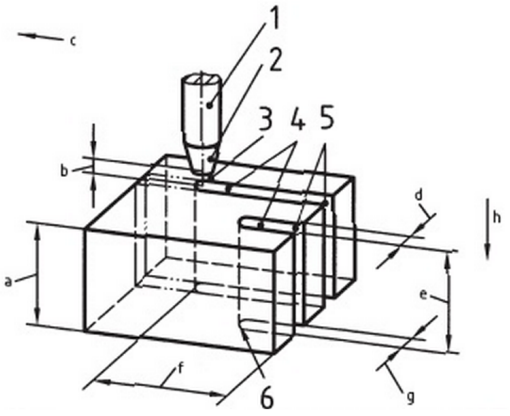
- Sumblimations skæring - Fordampning af materiale som blæses væk ved højhastigheds gasstråle eller ved udvidelse af det fordampede materiale
  - Bruges ved skæring i tyndt metal eller til træ eller polymerer
- Fusions skæring - Smeltning af materiale som blæses væk ved højhastigheds gasstråle
  - Bruges ved skæring i tykkere metal
- Flammeskæring - Materialet antændes ved høj temperatur i en reaktiv gas, brændes og blæses væk ved højhastigheds oxygenstråle
  - Bruges ved skæring i tykt metal

En typisk opstilling for laserskæring er vist på figur 4.1. Udover laseren benyttes et aktueringssystem som f.eks. en industriel robot til flytning af laseren eller et xy-bord hvor arbejdsemnet flyttes som vist på figuren. Ved at flytte laseren kan fiksering af arbejdsemnet udelades. Yderligere kan en blænde benyttes til at pulsere strålen, med formålet at skære i tykkere plader, plader med høj refleksion eller termisk ledeevne. Yderligere benyttes pulsering til at undgå forbrændinger og opnå skarpe hjørner [Steen og Mazumder, 2010]. Derudover benyttes en linse til at fokusere strålen i en bestemt højde. Højden har indflydelse på strålens diameter og intensitet. Til at fjerne smelte benyttes en dyse, som blæser smelten væk således optikken beskyttes, og øger skærehastigheden ved hurtigere at blotlægge nyt materiale, samt undgå størknet smeltet på pladen.

I forbindelse med laserskæring vil der fremover i rapporten blive refereret til geometrier og udstyr i henhold til figur 4.2 og 4.3.

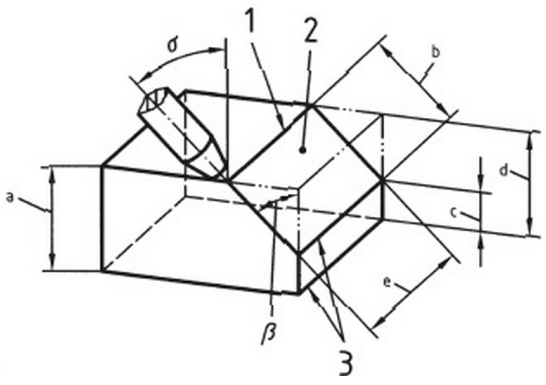


Figur 4.1: *Generel opstilling ved laserskæring [Steen og Mazumder, 2010].*



1	Laserhoved	a	Arbejdsemnetykkelse
2	Dyse	b	Dyseafstand
3	Laserstråle	c	Skæreretning
4	Skæring	d	Skærebredde top
5	Start af skæring	e	Skæredybde
6	Slut af skæring	f	Snitlængde
		g	Skærebredde bund
		h	Stråleretning

Figur 4.2: *Betegnelser for laserskæring [DS/EN ISO 9013, 2002].*



1	Øvre skærekant	a	Arbejdsemnetykkelse
2	Skæreflade	b	Skæredybde (vinklet snit)
3	Nedre skærekant	c	Højde af rod (vinklet snit)
		d	Skæredybde (vertikalt snit)
		e	Skærelængde

Figur 4.3: *Betegnelser for laserskæring [DS/EN ISO 9013, 2002].*

Laserskæring er en af de mest anvendte industrielle applikationer for lasere, de anvendes typisk fordi de er i stand til at skære med høj kvalitet uden yderligere efterforarbejdning [Steen og Mazumder, 2010]. Investeringen i en laser er stor, men efterfølgende er et meget begrænset slid, da skæringen foregår uden kontakt. Yderligere er det ikke nødvendigt at fremstille værktøj til laseren, hvilket gør laseren fleksibel og yderst anvendelig til prototypefremstilling, fleksible produktionssystemer med mange omskiftninger og mindre serieproduktioner. Lasere er i stand til at skære i næsten alle materialer, og er specielt anvendeligt ved materialer som titanium, hvor stansning og fræsning kan være problematisk. Den største begrænsning ved laserskæring er pladetykkelsen, da laserskæring er egnet og effektiv ved skæring i tynde plader i tykkelsen 0.5 mm til 40 mm [DS/EN ISO 9013, 2002].

4.2 Procesparametre

Laserskæring er en ulineær multiparameter proces, hvorfor indstillingen af procesparametrene kan være en langsommelig og besværlig proces. Effekten ved at justere på en procesparameter er ikke gennemskuelig, da effekten af procesparametrene er forbundne og vekselvirker. Indstilles optimale parametre med henblik på en kvalitetsparameter, forringes graden af de resterende kvalitetsparametre [Dubey og Yadava, 2008]. At forbinde relationer mellem skærekvalitet og procesparametre, således en given skærekvalitet opnås, er derfor ikke nemt. Procesparametrenes betydning for skærekvaliteten skal således identificeres og kvantificeres på en måde, så de uafhængigt af lasertypen kan fortolkes og give en ønsket skærekvalitet.

De parametre som har indflydelse på kvaliteten af snittet for det skårne emne, kan inddeles i fire grupper som indbefatter skæregas, laserstråle, skæreopsætning og arbejdsemne. Parametrene for hver af disse fire grupper er vist i tabel 4.1, hvor de parametre som fungerer som konstante procesparametre er markeret med fed og de resterende vil fungere som designparametre.

Lasertråle	Skæreopsætning	Skæregas	Arbejdsemne
Effekt P	Skærehastighed v	Tryk p	**Tykkelse** a
Pulsfrekvens f	Fokusoffset L	Dysediameter d	**Materiale**
Pulsvarighed t	**Skærevinkel** ϕ,θ	**Gastype**	
Bølgelængde λ		**Dyseafstand** b	

Tabel 4.1: *Procesparametre for laserskæring.*

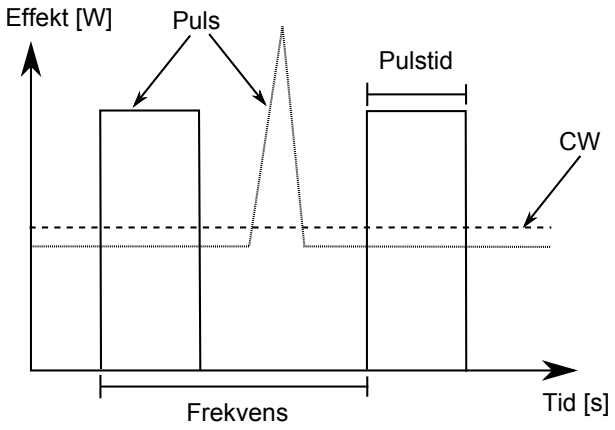
Dette er én måde at udvælge parametre på, istedet for bølgelængden kunne strålen være repræsenteret ved lasertypen eller fokusoffset ved strålediameteren. Opmålingen af strålediameteren er dog mere besværlig og tidskrævende, modsat vil strålediameteren være den samme 1 mm under og over fokuspunktet. Procesparametrene er udvalgt, således mindst mulig information går tabt.

Samtlige af disse parametre har en indvirkning på skærekvaliteten i forskellig grad, yderligere har de en vekselvirkning eller korrelation. Øges materialetykkelsen bør lasereffekten typisk øges, som således har en indvirkning på hastigheden. Konsensus blandt hidtil publiceret forskning er at effekten, hastigheden og gastrykket er af vigtigst betydning for kvaliteten [Dubey og Pandey, 2012]. Typisk for procesparametrene er, at de har et kritisk virkeområde hvor kvaliteten vil være bedst. Bliver effekten af laserstrålen for lav, gennemskæres pladen ikke, og ved for høj effekt vil afmærkninger af forbrændinger og et bredt skæresnit forekomme, såfremt de resterende parametre ikke indstilles derefter. I det følgende er procesparametrene uddybet. Forklaringer på relationer mellem procesparametre er dog ikke nødvendigvis entydige.

4.2.1 Laserstråleparametre

Effekten af laserstrålen indstilles primært afhængigt af dybden af snittet, og kan øges ved skæring ved høj hastighed og et materiale med overfladebehandling eller høj refleksion. Pulsering kan benyttes til at opnå en større effekt end en bestemt lasertype ellers ville være i stand til at levere. Pulsering kan foregå på flere måder, typisk benyttes en blænde der reflekterer lyset frem og tilbage indtil denne åbnes, og en stråle bestående af flere fotoner lukkes ud. En anden metode kan være at øge den mængde som pumpes til det aktive medie. Pulsering muliggør bl.a. skæring i tykkere emner, emner med høj refleksion eller termisk konduktivitet. Yderligere benyttes pulsering til at undgå forbrændinger og opnå skarpe hjørner [Steen og Mazumder, 2010].

Driftscyklusen for laserstrålen kan opdeles i tre parametre: effekt, pulsfrekvens og pulsvarighed. På figur 4.4 ses et eksempel på tre laserstråler ved en henholdsvis kontinuerlig stråle (CW) samt to pulserede stråler. Driftscyklusen er arealet under graferne, og tager højde for alle tre parametre, dog kan denne være ens for en pulseret og CW stråle til trods for at resultatet af skærekvaliteten er vidt forskellig. De tre stråleparametre giver dermed mest mulig information, men også indstillingsmuligheder som er tidskrævende ved faktorforsøg.



Figur 4.4: *Driftscycklus for laserstrålen ved pulsering og kontinuerlig stråle (CW).*

4.2.2 Skæreopsætningsparametre

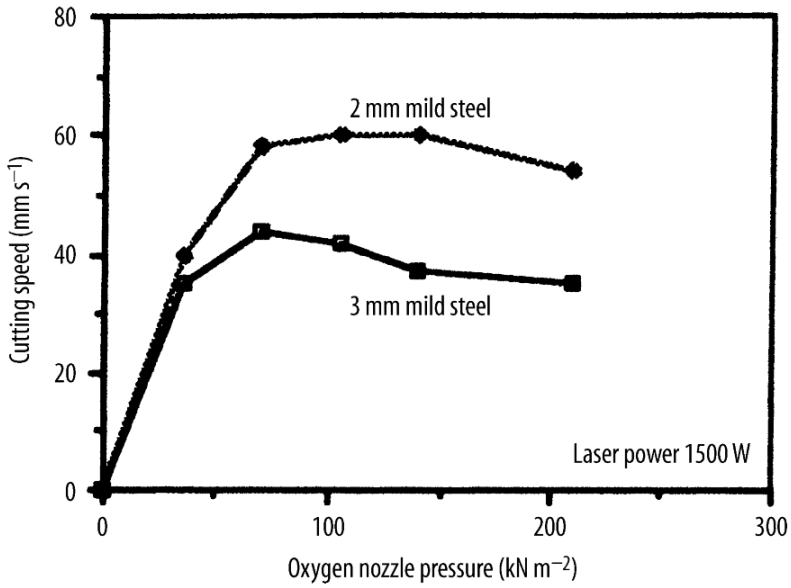
Skærehastigheden angiver den relative hastighed mellem bevægelse af enten laser, arbejdsemne eller begge. Skæretiden ønskes i alle henseender minimeret ved at øge skærehastigheden. En for høj hastighed kan dog føre til et snit, der ikke er gennemtrængende men vil ved korrekt indstillede procesparametre give et smallere snit, og mindre varmepåvirkning af det omkringliggende materiale. Lave hastigheder muliggør dog et mere kontinuerligt snit, specielt ved pulsering [Tsai et al., 2008].

Fokusoffsettet afhænger af den benyttede fokuslængde. Fokuslængden har indflydelse på intensiteten og diameteren af laserstrålen. I brændpunktet vil laserstrålen have den mindste diameter og største intensitet. Procesparameteren fokusoffset indeholder således eksplicit information om intensiteten og størrelsen af strålen, samt hvor dette er gældende i forhold til brændpunktet.

4.2.3 Skæregasparametre

Gassammensætningen kan have stor indvirkning på skærehastigheden og skærekvaliteten. Reaktive gasser som oxygen har en tendens til at skabe striationer, et kvalitetsproblem som er en cyklisk uregelmæssighed på snitfladen. Yderligere kan der dannes et oxid lag på skærefladen. Dette undgås ved brug af inaktive gasser. Ved reaktive gasser kan der forekomme en eksotermisk reaktion mellem gassen og metallet, herved øges energien som er til rådighed ved skæring og skærehastigheden kan således øges [Caydas og Hascalik, 2008].

Trykket af gassen muliggør at smelte fjernes nemmere og hurtigere, således laserstrålen hurtigere kan opvarme pladen i tykkelsesretningen og undgå at varmen spreder sig. Dermed kan skærehastigheden øges ved at øge trykket og fjerne smelten hurtigere, som vist på figur 4.5. Et højt gastryk kan dog foranledige forbrændinger af snitfladerne ved brug af reaktive gasarter. Ved brug af reaktive gasser benyttes typisk et tryk på 1-6 bar, og ved brug af inaktive gasser et tryk på 10-20 bar [Steen og Mazumder, 2010].



Figur 4.5: *Skærehastighed som funktion af gastryk [Steen og Mazumder, 2010].*

På figur 4.5 fremgår det at skærehastigheden stagnerer og reduceres over et givent gastryk, denne stagnering har vist sig at kunne øges ved at ændre på både formen og diameteren af dysen. Problemet skyldtes et turbulent gasflow som skabte trykbølger, der mindskede gastrykket ved arbejdsemneoverfladen. Dysediameteren har yderligere en effekt på, hvor højt gastrykket vil være og hvor meget det spredes ved arbejdsemnet [Steen og Mazumder, 2010].

4.2.4 Arbejdsemneparametre

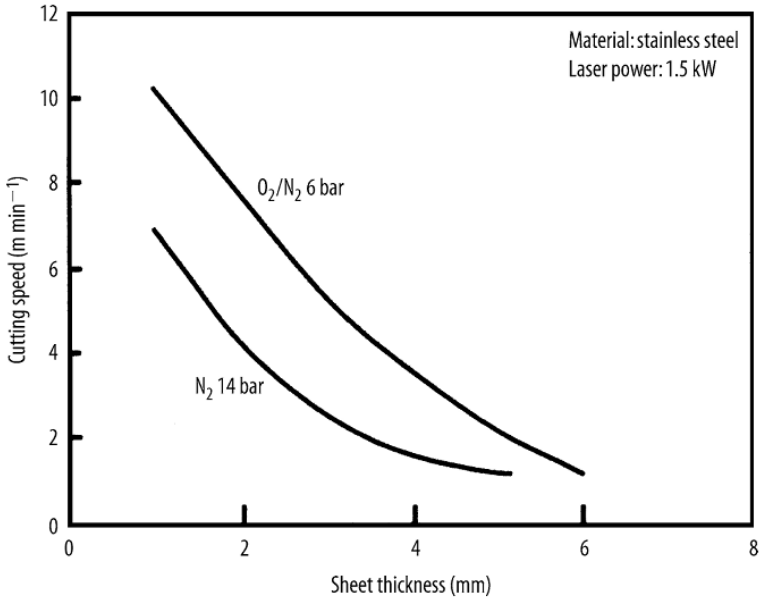
Nogle materialer er betydeligt sværere at laserskære end andre, og disse kræver omhyggeligt indstillede procesparametre. En høj termiske ledeevne medfører at varmen nemmere fordeles i arbejdsemnet. Dette gør laserskæringen mere effektiv og hurtigere, dog mere ukontrolleret idet varmen spredes i uønskede retninger og resulterer i en større og mere varierende snitbredde [Steen og Mazumder, 2010]. Derudover kan der opstå uønskede varmepåvirkede zoner, hvor materialets mekaniske og metallurgiske egenska-

berne kan ændres. En lav termisk ledeevne har dog vist at kunne give forkulling af pladens overside [Dubey og Pandey, 2012].

Materialets reflektivitet afgør hvor meget af laserens energi som absorberes og udnyttes. Derudover har temperaturen en indvirkning på absorptionen, da en øget temperatur vil øge mængden af fotoner som elektronerne absorberer, og forplanter sig som vibrationer gennem molekylestrukturen frem for at blive genudsendt som stråling [Steen og Mazumder, 2010].

Tykkelsen er af afgørende betydning for, hvorvidt pladen er mulig at laserskære eller ej. Standarden for termisk skæring angiver ikke nogen maksimal tykkelse for laserskæring, der er anvist hvilken kvalitetet der kan opnås ved skæring i pladetykkelser på op til 10 mm. I industrien laserskæres plader på 200 mm tykkelse, tykkere end dette kræver flamme, plasma eller konventionel mekanisk skæring [Caristan, 2004].

Tykkelsen har en afgørende effekt på skærehastigheden og lasereffekten. Ved stigende tykkelse kræves stigende effekt. Tykkelsen besværliggør en uniform skæring i tykkelsesretningen og foranlediger forkulling og spredt varmepåvirkning omkring skæresnittet. På figur 4.6, fremgår det at skærehastigheden er faldende med stigende pladetykkelse.



Figur 4.6: *Skærehastighed som funktion af pladetykkelse [Steen og Mazumder, 2010].*

4.3 Kvantifisering

Lasercellen stillet til rådighed af Institut for Produktion har to lasere, en aktueringsmekanisme og en gastype til rådighed. Dermed vil gastypen være en konstant parameter. De to lasere der er stillet til rådighed er begge solidstate lasere, den ene af mærket Trumf med en bølgelængde på 1.064 μm og den anden en IPG med en bølgelængde på 1.064 μm.

Skæring i vinklede plader har en negativ indvirkning på skærekvaliteten [Yilbas et al., 2008] og er således uønsket hvis undgåeligt. Emnet fra Grundfos kræver plane udskæringer, derfor undlades det at eksperimentere med vinklede skæringer. Dyseafstanden og dysediameteren er begge parametre med indflydelse

Designparametre	Værdi	Konstante parametre	Værdi
Skærehastighed	0 - 25000 [mm/s]	Gassammensætning	Nitrogen
Gastryk	0 - 60 [bar]	Materiale	Statorblik
Effekt	0 - 3000 [W]	Tykkelse	0,5 [mm]
Fokusoffset	$\pm$ 55 [mm]	Dyseafstand	1 [mm]
Dysediameter	0,8 - 2,5 [mm]	Vinkling	0°
Pulstid	1 - 60.000 [ms]	Bølgelængde	1,06 μm
Pulspause	1 - 60.000 [ms]		

Tabel 4.2: *Grov diskretisering af procesparametre.*

på gastrykket. Afstanden fastholdes i en længde af 1 mm [Ghany og Newishy, 2005] og diameteren varieres blandt tilgængelige dysediametre.

Materialet benyttes som procesparameter istedet for reflektiviteten og varmeledningsevnen, da antallet af forskellige materialer som er benyttet er begrænset, og det vil kræve udførsel af forsøg at måle reflektiviteten og varmeledningsevnen. Under forsøgende skæres i 0,5 mm tykke statorbliks plader.

Værdierne opgivet i tabel 4.2 for gastrykket, skærehastigheden, effekten, pulstiden, pulspausen og fokusoffsettet er alle begrænsede af forsøgsudstyret. Yderligere diskretisering af disse værdier foretages og forklares i kapitel 6.

Måleparametre og målemetoder

5

Ved laserskæring forekommer en række kvalitetsmæssige problemer. Ønskes en bestemt skærekvalitet eller ønskes skærekvaliteten optimeret, er det nødvendigt at de procesparametre som er udvalgt, har en indflydelse på kvaliteten. Måden hvorpå en kvalitetsparameter karakteriseres og måles på, er af stor betydning for hvad der kan forbedres, samt præcisionen af opmålingerne. Skærebredden kan f.eks repræsenteres ved forskellen mellem den største og mindste skærebredde langs skæreretningen eller i pladetykkelsen, ved oversiden eller undersiden af pladen. Yderligere kunne den største skærebredde eller den mindste skærebredde benyttes. Valget afhænger af hvad der er vitalt for kvaliteten af hvad der produceres, hvilken målemetode der benyttes og hvad der er muligt for denne målemetode, samt hvad tiden tillader. I dette kapitel præsenteres de kvalitetsparametre som benyttes samt den tilhørende målemetode.

Først præsenteres de kvalitetsmæssige problemer ved laserskæring, som vil have betydning for statorlamellernes funktion. Dernæst gives en forklaring af hvorledes disse kvalitetsmæssige problemer parametriseres, samt hvorledes de er opmålt. Ved hver opmålingsmetode er usikkerheder og præcision gennemgået.

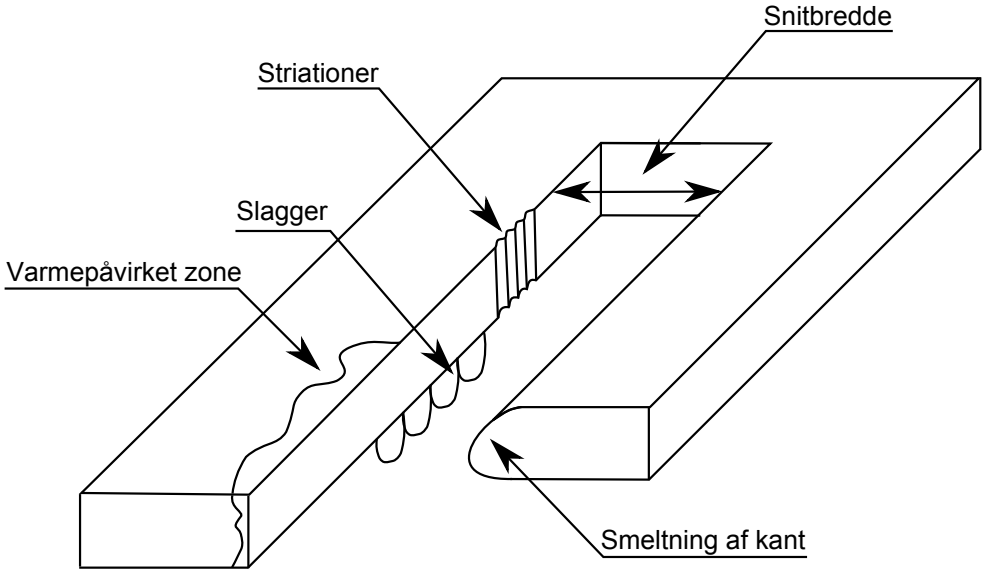
5.1 Skærekvalitet

Da et af de største incitementer for at anvende laserskæring er den høje skærekvalitet sammenlignet med andre skæreprocesser, er det nødvendigt at have nogle generelle og målbare parametre for kvaliteten af en skæring [Steen og Mazumder, 2010]. Skærekvalitet bør ved laserskæring evalueres i hht. den nyeste internationale standard [DS/EN ISO 9013, 2002]. Denne standard angiver hvilke geometriske parametre som angiver kvaliteten ved laserskæring, hvorledes disse måles og fortolkes.

Da det er valgt at anvende Computer Vision (CV), kan der opnås en række forskelle fra de foreskrevne målemetoder fra standarden. Med CV opnås en større mængde information, der vil give flere målepunkter, dette beskrives i afsnit 5.2. Ved anvendelse af en alternativ målemetode ønskes det stadig at have et udtryk for de samme parametre, som standarden, da det derved kan sammenlignes med andre projekter. De alternative målemetoder benyttet i projektet, er i tabel 5.1 sammenlignet med standarden.

Kvaliteten af statorlamellen afhænger primært af permeabiliteten og de geometriske tolerancer. Ved laserskæring er der en række kvalitetsmæssige problemer der kan have indflydelse på permeabiliteten, disse er vist på figur 5.1 og indbefatter geometrien, varmepåvirkning, og overfladerugheden som udtryk for skæg og striationer. De kvalitetsparametre som har indvirkning på permeabiliteten og de geometriske tolerancer for statorlamellerne indbefatter:

Skærebredden af snittet har betydning for præcisionen af skæringen, og mulliggør skæringer af komplicerede geometrier og finere tolerancer ved smalle skærebredder. Denne parameter er et udtryk for hvor



Figur 5.1: *Kvalitetsproblemer ved laserskæring.*

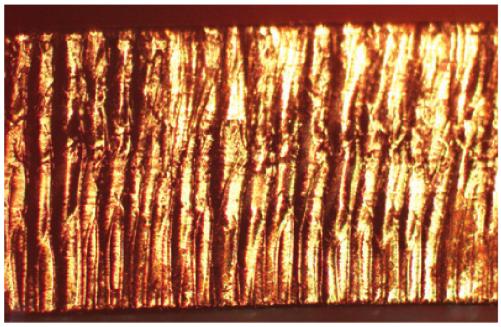
	Standard	Alternativ Målemetode (CV)
Skæg	Ikke beskrevet.	Højde måles ved mikroskop og CV.
Vinkelrethed	Måles vha. en bænkvinkel.	Afstand måles ved mikroskop og CV.
Hjørnetolerance	Måles vha. en radiuslære, kun for toppen af skæringen	Areal måles ved mikroskop og CV, både for top og bund af skæringen.
Skærebredde	Ikke beskrevet.	Længde måles ved mikroskop og CV, for top og bund.
HAZ	Ikke beskrevet.	Måles ikke
Striationer	Måles vha. en smigvinkel	Måles ikke
Skæredybden	Ikke beskrevet.	Visuel inspektion.

Tabel 5.1: *Sammenligning af måleparametrene som benyttes i projektet og anvisningen for måleparametrene fra ISO/DS.*

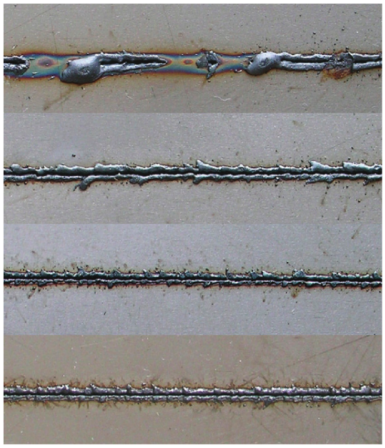
geometrisk præcist et skæresnit det er muligt at opnå. Størstedelen af publiceret forskning vedrørende procesparameteroptimering for laserskæring tager udgangspunkt i bredden af skæresnittet som udtryk for kvaliteten, se tabel 5.3. Som det fremgår af arbejdstegningen i bilag F, skal der udskæres skarpe hjørner med tolerancer på $\pm$ 0,05mm. Det er derfor ønskværdigt at opnå en skærebredde på under 0.1mm. Skærebredden af snittet måles i toppen og bunden, dette vil ikke nødvendigvis være den største eller mindste bredde. Skulle den største eller mindste bredde måles, ville dette være både tidskrævende og kompliceret at finde, da den største eller mindste skærebredde ikke nødvendigvis befinder sig i samme dybde ved hver skæring.

Skæredybden afgør hvorvidt skæringen er komplet og fuldendt eller utilstrækkelig. Denne parameter kan opfattes som en enten eller parameter, da et ufuldstændigt skæresnit vil gøre skæringen ubrugelig, såfremt der ikke tales om f.eks. laserboring, svejsning eller lasergravering. Øverste skæresnit på figur 5.3 viser en svejsning, hvor snittet ikke er gennemskåret i hele skæreretningens længde.

Skæg opstår når materialet smeltes ved opvarmning, og smelten ikke blæses væk af et gastryk. Smelten vil størkne på undersiden eller den nederste kant af skæringen, og ligge sig som skæg i form af små størknede dråber. På figur 5.3 er vist fire skæresnit med skæg. Skæg øger overfladerugheden og pladetykkelsen lokalt, og vil give et uønsket mellemrum mellem statorlamellerne, således statorens flux påvirkes. Skæg udgør en ekstra udgift i form af efterbearbejdning ved slibning, men i visse tilfælde kan emnegeometrien umuliggøre eventuel efterbearbejdning.



Figur 5.2: *Striationer på skæreflade [Yilbas et al., 2008].*



Figur 5.3: *Undersiden af fire skæringer med skæg, hvor det øverste er en svejsning med HAZ [Kek og Grum, 2009].*

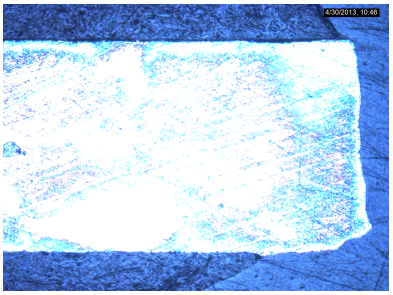
Hjørnetolerancen angiver geometrien af skæresnittets kanter. Smeltningen af kanter og snitflader er et resultat af hvorledes varmen har fordelt sig ned gennem snittet og hvordan intensiten af strålen er gennem snittet. Hjørnetolerancerne for top og bund er et udtryk for, hvor meget materiale der er smeltet ved kanterne når usmeltet materiale penetreres ved oversiden eller pladen gennemskæres ved undersiden. Måles skærebredden uden at sammenholde med hjørnetolerancen, kan et smalt snit skyldes størknet smelte på kanten, som kan være uhensigtsmæssigt til trods for at der ønskes en lav skærebredde.

Vinkelretheden er et udtryk for ujævne skæreflader, og er et resultat af smelte, varmefordeling og stråleintensitet ned gennem skæringen. Vinkelrethedstolerancen u er et udtryk for den største højdeforskel på skærefladen, og dermed vinkelretheden af skærefladen som vist på figur 5.5. På figuren angi-

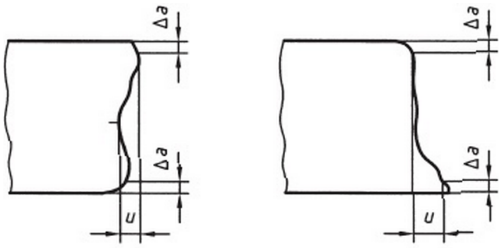
[h]	Pladetykkelsen, a [mm]	Δa [mm]
	$a \leq 3$	$0,1a$

Tabel 5.2: *Dimensioner for Δa [DS/EN ISO 9013, 2002].*

ver Δa en begrænsning for måleområdet på overfladen for u, for at undgå at medtage kanterne. Pladetykkelsen a afgør begrænsningen af måleområdet Δa som vist i tabel 5.2.



Figur 5.4: *Smeltning af kant, set vinkelret på strålen, som er fra top mod bund.*



Figur 5.5: *Vinkelretheden (u) [DS/EN ISO 9013, 2002].*

De parametre som måles er hermed øvre og nedre snitbredde, hvorvidt snittet er gennemskåret eller ej, højden af skæg, smeltning af øvre og nedre kant, samt vinkelrethedstolerancen af snitfladen. Udover disse syv kvalitetsparametre, eksiterer to andre hyppigt forekommende kvalitetsparametre som ikke måles:

Varmepåvirkede zoner (HAZ) er den del af materialet omkringliggende snittet, som påvirkes af opvarmningen. Dette fremstår typisk som forbrændinger, der er mørke, brune eller sorte områder, og kan have indvirkning på permeabiliteten. Dette skyldes ændringer i korngrænser og kornstørrelser. Yderligere kan varmepåvirkningen ændre materialets mekaniske egenskaber. Øverste skæresnit på figur 5.3 viser en varmepåvirkning på overfladen, denne kan ligesåvel være udbredt indvendigt. Varmepåvirkningen er ikke påvist relateret til permeabiliteten [Belhadj et al., 2001], og har ikke været tilstedeværende i prøveskæringer foretaget for at undersøge skærekvaliteten, dermed benyttes denne parameter ikke.

Striationer er resultatet af uregelmæssig smeltning af materiale. Der er flere teorier for dannelsen af striationer, disse indbefatter at smeltemængden kræver en kritisk størrelse før den kan blæses væk, eller at strålen har en tendens til at bevæge sig foran smelten, således strålen rammer usmeltet materiale. Da det usmeltede materiale ikke er vinklet øges stråleintensiteten, således smelter materialet hurtigere og bevæger sig hurtigere ned. Dette fænomen er specielt tydeligt ved pulsering [Steen og Mazumder, 2010]. Overfladerugheden på skærefladen afhænger af hvorvidt disse fremkommer eller ej, og mængden af disse. På figur 5.2 er vist en skæreflade med striationer. Grundet den lave pladetykkelse måles overfladerugheden som følge af striationer ikke.

For at danne et overblik over hidtil påviste relationer og indvirkninger blandt procesparametre og skærekvaliteten, er disse listet i tabel 5.3. Den påviste effekt ved at øge procesparametrene er vist med "$-$"ved en negativ indflydelse, "$+$"ved en positiv indflydelse og "$*$"ved en uklar men påvist effekt. Denne tabel er

dog ikke entydig, da disse sammenhænge typisk er fundet afhængigt af forskellige konstante og variable parametre. Tabellen er et sammendrag af konklusioner fra publiceret forskning.

	Skærebredde	Overfladerughed	Skæg	Dybde	Striationer	HAZ
Laserstråle						
Effekt	-	-		+	-	-
Pulsfrekvens	+	+	+		+	+
Pulsvarighed		+	+		+	
Skæregas	-	-				
Tryk	-	-		+		*
Dyse afstand			*			
Gassammensætning	*	*			*	*
Skæreopsætning						
Hastighed	+	+		-	-	+
Brændpunkt	+	-				
Arbejdsemne						
Termisk ledeevne					+	+
Tykkelse		-			-	-

Tabel 5.3: *Relationer mellem kvalitetsparametre [Caydas og Hascalik, 2008] [Dubey og Yadava, 2008] [Eltawahni et al., 2012] [Dubey og Pandey, 2012] [Dubey og Pandey, 2012] [Tsai et al., 2008] [Kuo et al., 2011] [Yilbas et al., 2008] [Steen og Mazumder, 2010] [Ghany og Newishy, 2005].*

5.2 Måling af måleparametre

Dette afsnit indeholder en beskrivelse af de anvendte målemetoder af kvalitetsparametrene. Fremgansmåden forklares med en vurdering af måleusikkerheder for hver målemetode.

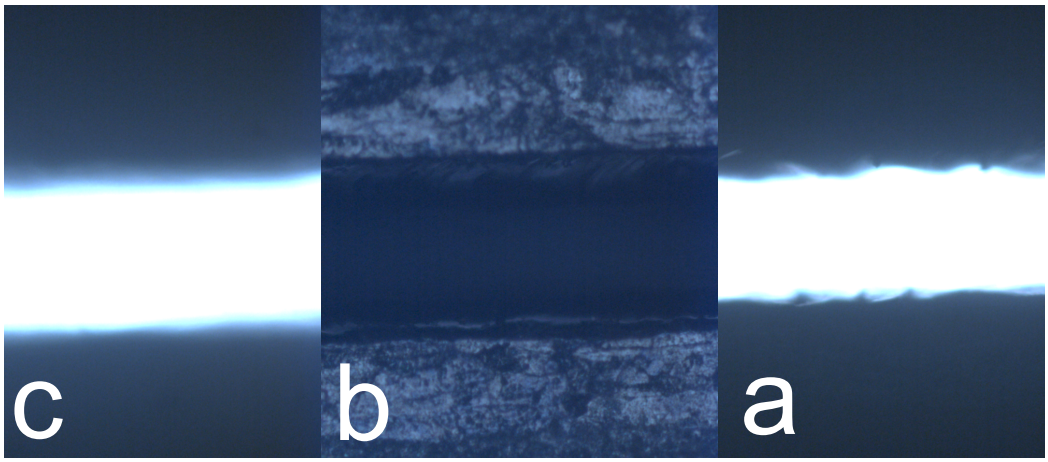
5.2.1 Automatisering af målemetode

I dette projekt skal en større mængde forsøgsdata indsamles, og derfor automatiseres måleprocessen. Selv om kvalitetsparametre der ønskes målt, er defineret på baggrund af standarden for termisk skårne flader [DS/EN ISO 9013, 2002], er der ikke fundet, nogle tidligere forsøg på at automatisere disse. Fordelene ved at automatisere en måleproces er, at den menneskelige usikkerhed vil blive reduceret, og det vil være muligt at opnå en ensartet målerutine mellem de givne forsøgsemner, og minimere den relative måleusikkerhed.
Da de udvalgte kvalitetsparametre er specifikt definerede afstande, er det muligt at opstille en automatisk målemetode. Det er valgt at automatisere måleprocessen vha. Computer Vision, hvor inputdata er indsamlet vha. mikroskop. Pixelbaserede metoder benyttes, eftersom disse vurderes tilstrækkelige at benytte frem for mere generiske og empiriske modeller [Morimoto et al., 2000].

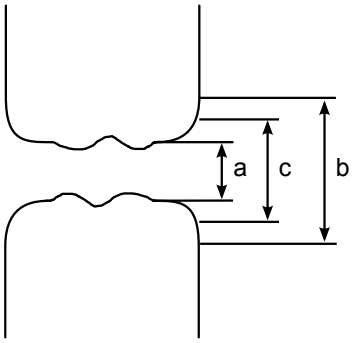
5.2.2 Skærebredde top og bund

Skærebredden efter en laserskæring kan variere gennem materialetykkelsen, grundet varmefordelingen under skæreprocessen. Det er valgt at undersøge toppen og bunden af skærebredden, der hhv. er laserens indgangsside og udgangsside.

For at repræsentere skærebredden over en længere del af skæringen, undersøges skæringen ved den øvre og nedre skærekant vist på figur 4.3 frem for at måle bredden i starten af skæringen, som vist på figur 4.2. Således opnås flere målepunkter for skærebredden. Da der ikke er et entydigt målepunkt for top og bund er det nødvendigt at undersøge hvor top og bund af skæringen er. Ved at se på figur 5.16 kan det ses at toppen af skæringen ikke har en skarp kant, mens der er risiko for skæg ved bunden af skæringen, disse faktorer er med til at gøre definitionen af skærebredden vanskelig. På figur 5.6 ses tre billeder af samme skæring, hvor skæringen til venstre er med fokus på overfladen og belysning fra bagsiden, billedet i midten er med fokus på oversiden og belysning fra oven, mens billedet til højre er med underbelysning og fokus indstillet herefter, der er undersøgt til at være ca. 0.1 mm nede i pladen. På figur 5.16 ses det at 0.1 mm nede i pladen, er hvor hjørnerundingen ophører, og en ret line former en skæreflade. De tre billeder viser tre forskellige bredder af skæringen, som vist på figur 5.7, og det vil være et definitionsspørgsmål at vælge mellem disse. Det er valgt at anvende metoden med belysning fra bagsiden, og fokus herefter, da det vurderes at det vil være denne bredde der vil blive målt, ved anvendelse af et søgeblad, eller en skydelære.



Figur 5.6: *Tre billeder af samme skæring. c: fokus på overfladen og belysning fra bagsiden, b: fokus på oversiden og belysning fra oven, a: underbelysning og fokus indstillet herefter.*

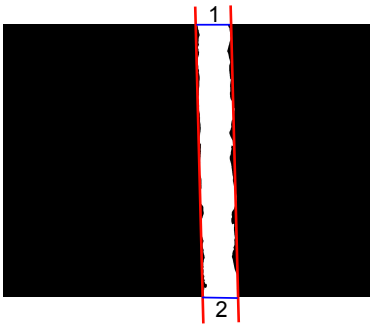


Figur 5.7: *a: underbelysning og fokus indstillet herefter. b: fokus på oversiden og belysning fra oven. c: fokus på overfladen og belysning fra bagsiden.*

Ved at undersøge skæringerne gennem mikroskop, med belysning fra bagsiden, er det muligt at opnå en tydelig markering af skæringen. Det er derfor muligt at anvende en pixelbaseret analysemetode for at definere skærebredden. Ved at konvertere billedet af skæringen fra farvebillede til gråtonet, er det muligt at opnå et binært billede, hvor skæringen fremstår som hvid, og det skårne emne fremstår sort, se billederne på figur 5.8.

Figur 5.8: *Venstre billede er et farvebillede, det midterste billede er et gråtonet billede, og det højre billede er et binært billede.*

Det binære billede kan betragtes som punkter i et 2 dimensionalt koordinatsystem, og lineær algebra, kan derfor anvendes til at evaluere billedets indhold. Da det kan være svært at vurdere skærebredden ud fra et enkelt punkt, er det bestemt at finde et gennemsnit for den fundne skærebredde. For at bestemme et gennemsnit, er de to skærekanter blevet lineariseret, ved at bruge de pixels der beskriver kanterne, og derpå anvende mindste kvadraters metode, til at fitte en lineær funktion hertil. Når de to funktioner er fittet, findes den maksimale og minimale afstand mellem funktionerne, og gennemsnittet, som er et udtryk for skærebredden i pixels. De to lineære funktioner samt den mindste og største afstand, kan ses på figur 5.9.

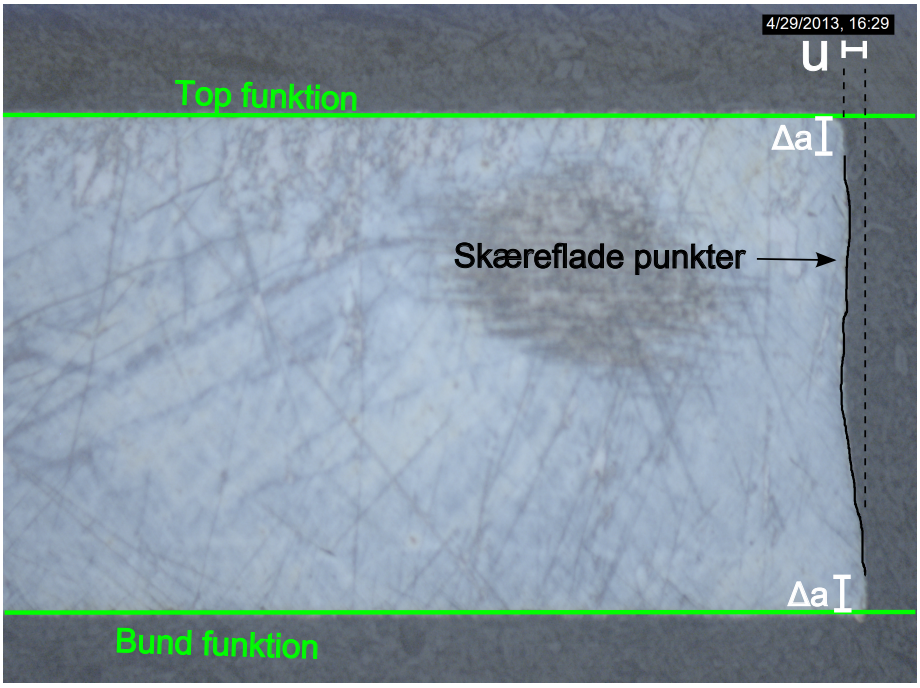


Figur 5.9: *Afstand 1 og 2, henholdsvis minimum og maksimum afstande, for de to fittede lineær funktioner.*

Denne metode kan anvendes til bestemmelse af skærebredden for både top og bund, afhængigt af om inputbilledet er taget fra toppen eller bunden.

5.2.3 Vinkelrethed

Når en skæring er skåret, er det interessant at undersøge et tværsnit af skæringen. Ved at analysere et tværsnit af skæringen, er det muligt at undersøge vinkelretheden af skæringen. Det er samtidig muligt at undersøge hjørnetolerancen af den øvre og nedre kant.
På samme måde som for skærebredden, bliver et tværsnit af skæringen undersøgt under mikroskop, et billede tages og billedbehandles til et binært billede. På det binære billede, defineres den skårne plades top og bund, dette sker ved at finde de punkter der definerer omridset af emnet på billedet, i områderne hvor pladen ikke er påvirket af skæringen. Disse områder kan ses på figur 5.10, som top funktion og bund funktion. Når top og bund er tilnærmet med lineære funktioner, findes de punkter der definerer omridset af emnet ved skærefladen, og som ligger inden for top og bund funktionerne, plus Δa, som beskrevet i afsnit 5.1. Når skærefladen er defineret, kan forskellen mellem den største og mindste højde af skærefladen findes, som er et udtryk for vinkelretheden u.



Figur 5.10: *Figur af tværsnittet, af en skæring, hvor top og bund er tilnærmet med lineære funktioner og skærefladen er defineret.*

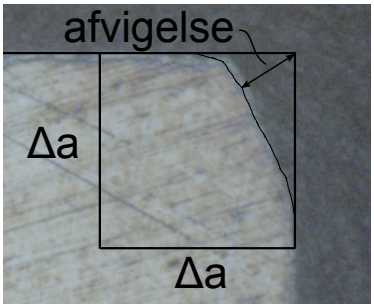
5.2.4 Hjørnetolerancer

Hjørnetolerancen er et udtryk for hvor meget emnet afviger fra den ønskede geometri. For at have et reference punkt for den ønskede geometri, defineres et teoretisk hjørne Δa, som anvendes til definition af hjørnet, og kan ses på figur 5.13. 3 fremgangsmåder for beskrivelse af denne tolerance, er diskuteret:

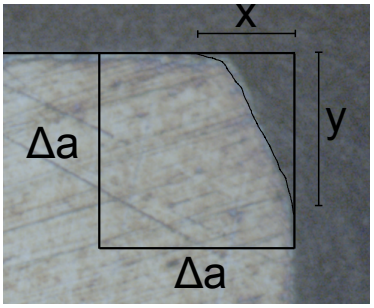
Areal
Afgrænsning af hjørnet foretages, og derefter kan arealet sammenlignes med det teoretiske hjørne, se figur 5.13. Fordelen ved denne metode er, at flere målepunkter anvendes til at beskrive hjørnet. Ulempen vil være at arealet er en sum af mange målepunkter, og derved vil forskellige geometrier, kunne repræsentere den samme areal værdi.

Afvigelse i x- og y-retningen
Afstanden fra emnet til det teoretiske hjørne, i x- og y-retningen, vil kunne beskrive hjørnets afvigelse, se figur 5.12. Fordelen ved denne fremgangsmetode er, at tolerancen får to parametre, og det vil derfor være muligt at vurdere forskellene på de to parametre.

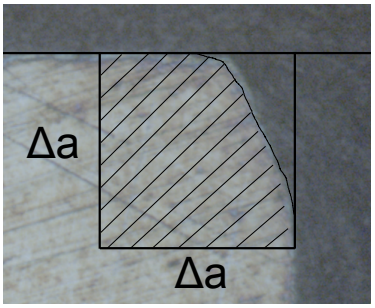
Afstand fra teoretisk hjørne
Den korteste afstand fra det teoretiske hjørne til emnet, se figur 5.11. Fordelen ved metoden er, at denne kan beskrive afvigelsen i kun én variabel. Situationer kan dog forekomme hvor hjørnets geometri, vil kunne give en lav afvigelse, mens arealet af hjørnet vil kunne være mindre end den afvigelse der udtrykkes.



Figur 5.11: *Korteste afstand til hjørne.*



Figur 5.12: *Afvigelse i x og y retning.*



Figur 5.13: *Måling af areal.*

Efter inspektion af de første billeder, blev det vurderet at afvigelsen i x- og y-retningen, ikke vil være nødvendig i toppen, da de fleste skæringen ser ud til at have den samme geometriske udformning, og derved vil arealet give et bedre billede af toppens hjørnetolerance. For hjørnet ved bunden af skæringen vil x- og y-målemetoden være ideel, da flere af skæringerne vil have skæg, der kan kvantificeres herved. Skægget er dog opmålt som en maksimum højde over en skæringslængde, da det ved tværsnittet ikke vides om det er på skægget højeste punkt der er skåret på tværs. Det er valgt at måle på arealet af hjørnet.

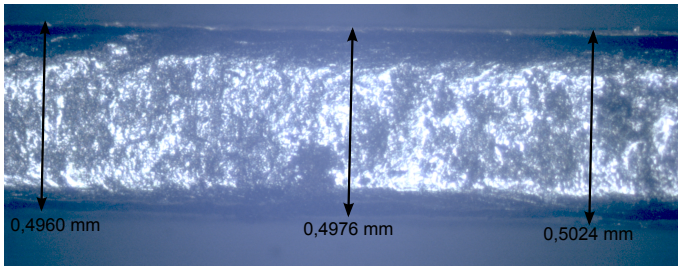
5.2.5 Skæg

Skægget opmåles ved at tage et billede vinkelret på skærefladen, og manuelt opmåle længden fra oversiden af pladen til bunden af det højeste skæg. Pladetykkelsen fratrækkes længden, for at finde højden af skægget. Den opmålte længde blev konverteret fra pixels til mm. Konverteringsfaktoren er angivet i softwaren LAS til mikroskopet, og er eftervist ved måling af 1 mm på en skydelære. Konverteringsfaktoren gør sig gældende ved alle målemetoderne.

5.2.6 Verificeringer af målemetoder

For at kunne anvende de indsamlede data, er det nødvendig at undersøge afvigelse og gentagelsesnøjagtigheden for datasættet. De geometriske målinger af tværsnittet vil blive undersøgt, ved at måle en kendt geometri. Anvendelsen af underbelysning til måling af skærebredden, undersøges ved at måle en kendt geometri, samt sammenligne med et billede taget med overbelysning.

Et søgeblad anvendes som kendt geometri, da dette er 0.5 mm, med en tolerance på ± 0.022 mm, dvs. målingen skal være mellem 0.478 mm og 0.522 mm.



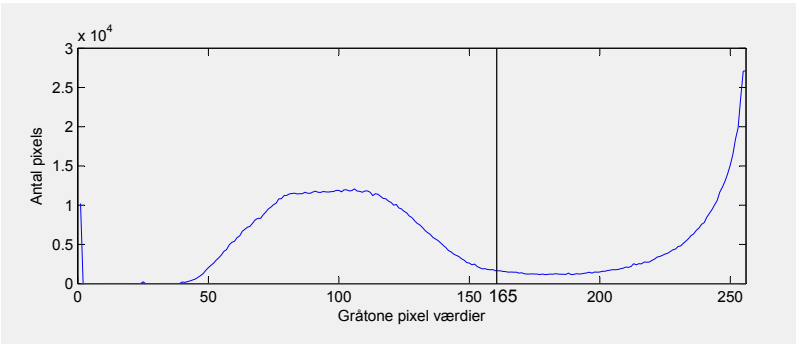
Figur 5.14: *Tre målinger af bredden af søgebladet.*

På figur 5.14 ses 3 målinger af bredden af søgebladet, hvor alle 3 målinger er inden for søgebladets tolerancer. Resultatet af breddemålingen af søgebladet, viser at de geometriske målinger er præcise ned til de pixelværdier der opmåles, dvs. hvis det binære billede er reelt, vil målingen være præcis. Der findes forskellige indstillingsparametre i softwaren LAS, medfølgende mikroskopet, til billedbehandling og indstilling af blændetid for kameraet. Disse indstillinger er påført billedet før det binære billede er fundet, og deres indflydelse på målingerne undersøges.

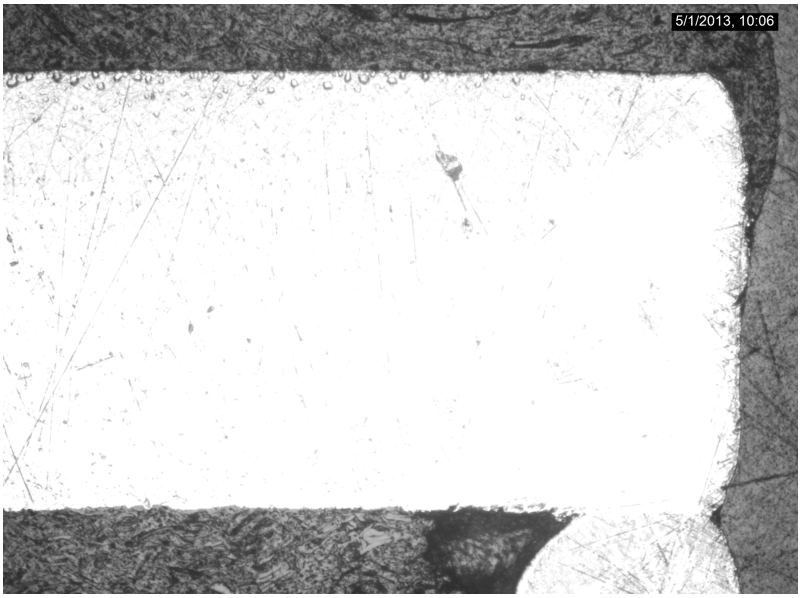
Tærskelværdi

Billederne taget med mikroskopet er i farver, men de er med en meget lav farveintensitet, og derfor er konvertering til gråtonebilleder, foretaget med en standard funktion i OpenCV. Gråtonebilledet er et 8-bit billede, og der er derfor kun brug for én tærskelværdi, for at skelne mellem emne og baggrund. Tærskelværdien er essentiel for at dimensionerne af emnet er korrekte, hvis den vælges for lav, kan dele af emnet blive betragtet som baggrund, og hvis den sættes for højt, vil baggrunden blive betragtet som emnet.

For at øge sikkerheden for at denne grænse vælges korrekt, plottes et histogram af billedet, vist på figur 5.15. Histogrammet er for billedet på figur 5.16.

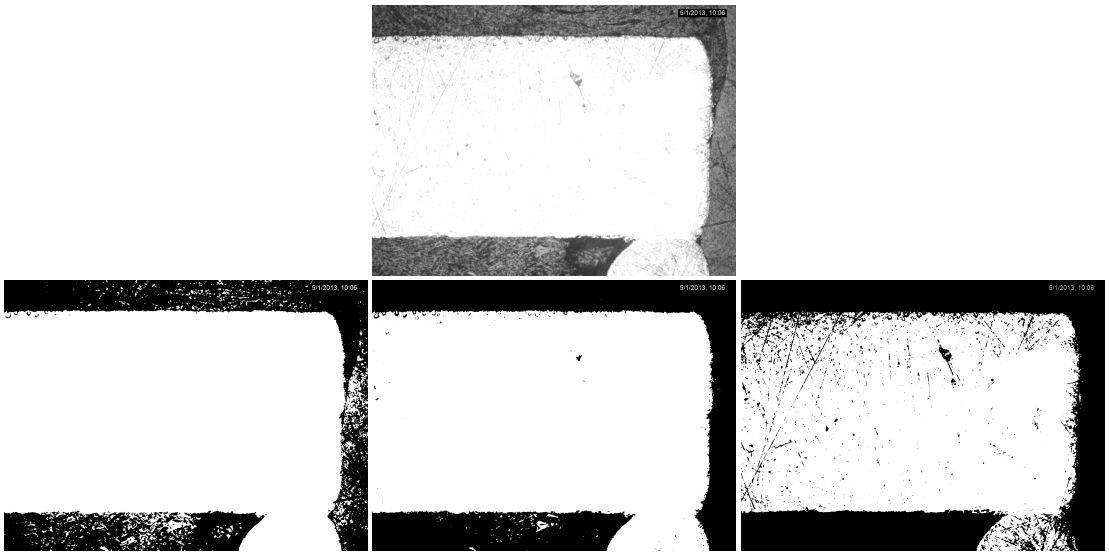


Figur 5.15: *Histogram over gråtone billede, med den valgte tærskelværdi.*



Figur 5.16: *Gråtone billede af tværsnit af en skæring.*

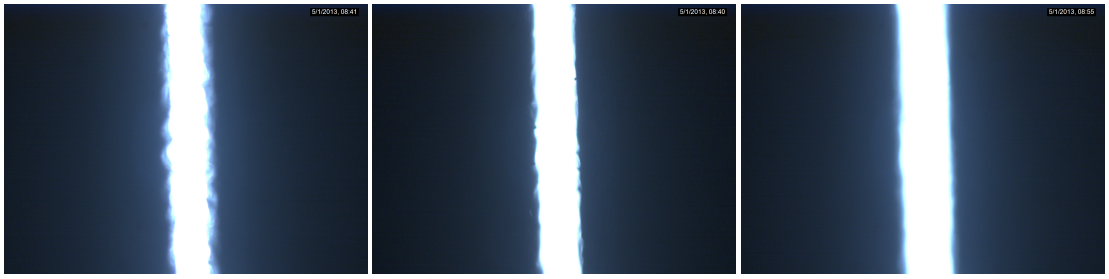
Figur 5.16 viser, at emnet af interesse er lyst, og vil derfor også have højere pixelværdier end baggrunden. På histogrammet ses to grupperinger af pixels, fra 50 til 150 og igen over 200. Gruppen over 200 er emnet, mens gruppen fra 50 til 150 er baggrunden. En tærskelværdi herimellem vil dele de to grupper. Der er valgt en tærskelværdi på 165, som kan findes på histogrammet figur 5.15, for at være sikker på at få hele emnet med. For at illustrere effekten af denne værdi er forskellige tærskelværdier på hhv. 140, 165 og 240 anvendt på billedet, for på den måde at kunne se at geometrien der måles på, ændres som vist på figur 5.17.



Figur 5.17: *Fra venstre, tærskelværdier: 140, 165, 240.*

Kameraparametre
Inden billedet binariseres, indstilles en række parametre for kammeraet. Disse indstillinger kan have stor effekt på histogrammet, og derved gøre det nemmere at finde emnet i billedet, eller i nogle tilfælde be-

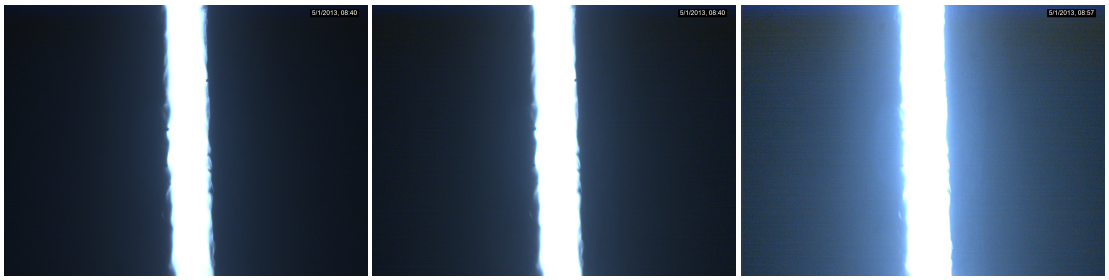
sværliggøre processen.
Fokuspunktet undersøges, da denne faktor er justeret mellem hvert billede. Der tages udgangspunkt i et billede med en skærebredde, hvor fokus er fundet, og herefter flyttes fokuspunktet 0,1 mm over pladen og 0,1 mm ned i pladen, se figur 5.18.



Figur 5.18: *Fra venstre, fokus under, på, og over pladetop.*

Det kan ses, at skærebredden ændres ved ændring af fokuspunktet. Bredden er målt på de tre billeder, og er 122,19 μm i fokus, 141,03 μm med fokus 0,1 mm under, og 157.51 μm med fokus 0,1 mm over. Dette giver en afvigelse på 15.42 % for fokus over pladen og 28.91 % for fokus under pladen.

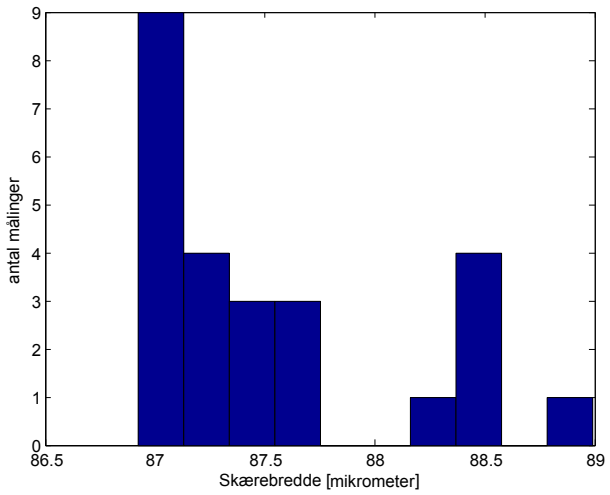
Lysstyrken, kan indstilles på forskellige måder, og alle ses ved samme effekt på billederne, der tages derfor udgangspunkt i lysstyrkefaktoren for billedeprogrammet. Lysstyrken er vurderet til at skulle være 2.5, og effekten for en værdi på 1 og en værdi på 10 undersøges, og kan ses på figur 5.19.



Figur 5.19: *Fra venstre, lysstyrkeværdier: 1, 2.5, 10.*

Skærebredden undersøges ved ændring af lysstyrken, og det ses at skærebredden måles til 18.38 % smallere ved en lysstyrke på 1, og 168.32 % bredere ved en lysstyrke på 10. Lysstyrken ændrer histogrammet markant for billedet, og derved skal tærskelværdien indstilles herefter. Det kan ses, at det er vigtigt at fastholde den samme lysstyrke for alle målinger. Lukketiden er undersøgt, og har samme effekt som lysstyrken, da længden af lukketiden bestemmer hvor længe SSD chippen er belyst.

For at undersøge gentagelsesnøjagtigheden, er der taget udgangspunkt i en måling af skærebredden, hvor en tilfældig skæring, er blevet mål 25 gange. Da det er gentagelsesnøjagtigheden for målemetoden der er interessant, bliver skærebredden målt det samme sted for skæringen, mens måleparametrene bliver indstillet mellem hver måling. De 25 målte skærebredder, er plottet i et histogram, og kan ses på figur 5.20.



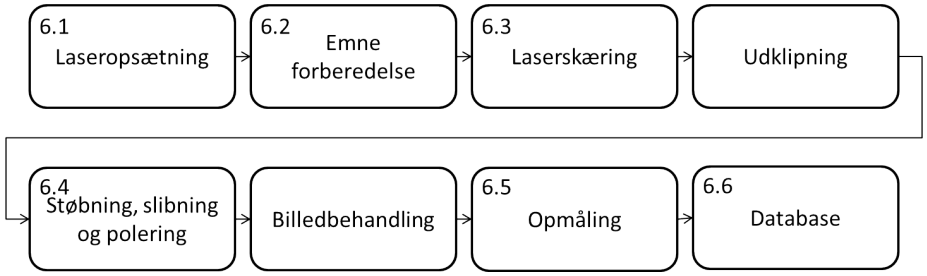
Figur 5.20: *Fordeling af 25 skærebreddemålinger af samme emne.*

Ud fra histogrammet ses en tendens til, at målingerne er en en-sides fordeling. Dette kan skyldes at indstillingen af fokus, kan give en bredere måling hvis billedet er ude af fokus i begge retninger. Ud fra de 25 målinger ses en forskel fra største til mindste breddemåling på 2 mikrometer, der svarer til en usikkerhed fra mindste måling på 2.3 %. Til sammenligning er usikkerheden for søgebladet 4.4 %.

Eksperimentelle forsøg

6

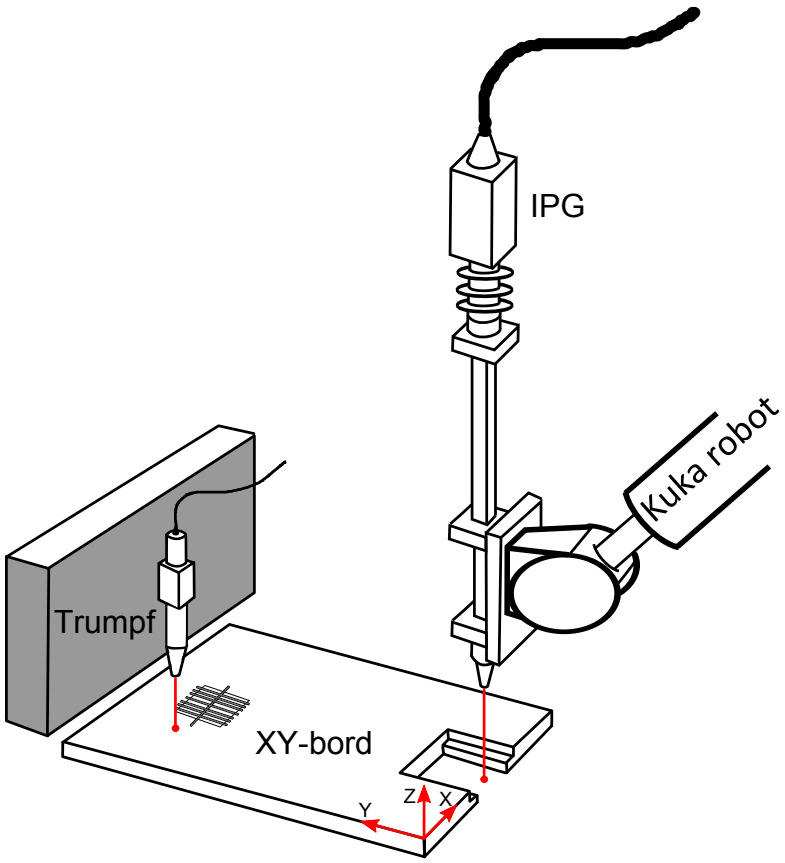
Dette kapitel indeholder en gennemgang af, hvordan de eksperimentelle data til databasen er indsamlet, hvilket udstyr der er anvendt, hvordan det er opstillet og fremgangsmåden for forsøgene. De forskellige procestrin for forsøgene ses på figur 6.1.



Figur 6.1: *Procestrin for indsamling af data.*

6.1 Laseropsætning

Den benyttede lasercelle består af 4 dele, en Trumpf laser, en IPG laser, et xy-bord og en Kuka robot, som ses på figur 6.2.



Figur 6.2: *Lasercelle setup.*

Kuka robot
Kuka robotten er en KR 120 med en gentagelsesnøjagtighed på $\pm$ 0,05 mm, og en løftekapacitet på 120 kg [Kuka, 2013]. Kuka robotten er anvendt til, at positionere og efterfølgende fiksere IPG laseren i forhold til emnet. Robotten benyttes til kalibrering af fokuslængden samt justering af dyseafstanden, hvilket er yderligere beskrevet i bilag C.

Trumpf laser og IPG laser
IPG laseren er funktionsdygtig, mens Trumf laseren ikke er tilsluttet, derfor er denne blevet tilsluttet som beskrevet i bilag C. De to lasere er sammenlignet i tabel 6.1.

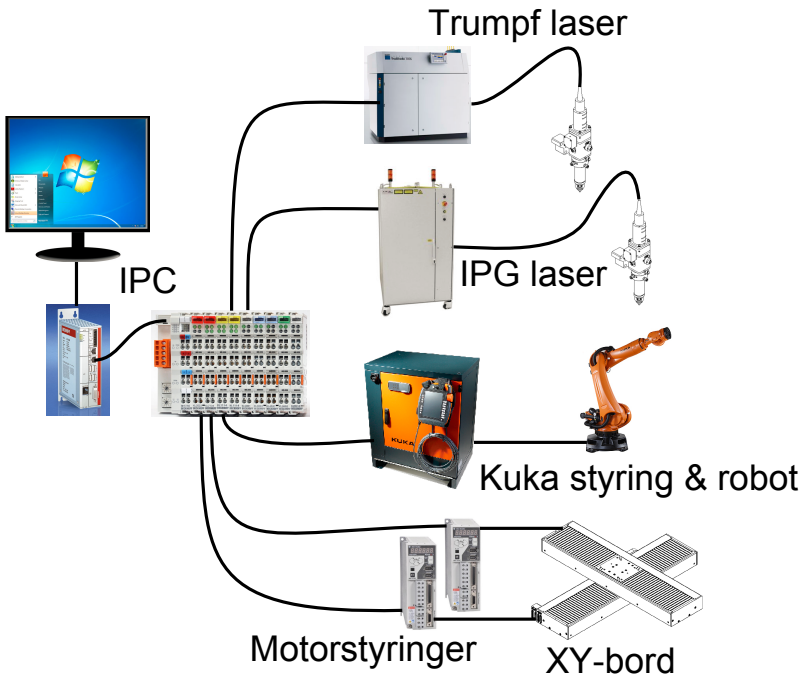
XY-bord
XY-bordet kan flytte sig i et todimensionelt plan, med en hastighed på op til 4 m/s og en acceleration på 4 m/s^2. I denne opstilling er et fikstur monteret på bordet, og derved er hastigheden og accelerationen af bordet begrænset. Hastigheden og acceleration er styret af en motorstyring og en PLC-regulering, der har stor betydning for XY-bordets ydeevne.

Lasercellen styres af en Industriel PC (IPC) fra Beckhoff. En IPC består af et soft realtids system (Windows 7 CE) og et hard realtids system (PLC). På denne måde udnyttes PLCens realtidssystem, mens brugerfladen stadig er overskuelig gennem Windows 7. IPCen styrer lasercellen, og er forbundet til laserne, robotten og XY-bordet som vist på figur 6.3. Trumpf laseren styres vha. et analogt signal der styrer

	Trumpf	IPG
Laser		
Type	Nd:YAG	Fiberlaser
Stråletype	Kontinuerlig	Kontinuerlig
Pulseringsfrekvens	100Hz	1000Hz
Maks. effekt	380 Watt	3000 Watt
Bølgelængde	1,064 μm	1,064 μm
Skæregas	Nitrogen	Nitrogen
Skærehoved		
Dysediameter	0,8mm, 1,0mm, 1,2mm	0,8mm, 1,2mm, 2,0mm, 2,5mm
Dyseafstand	Manuel	Kuka robot
Fokuspunkts indstilling	Manuel	Manuel
Fokuslængde	150mm, 200mm	200mm ,300mm ,470mm ,780mm

Tabel 6.1: *Laserparametre for Trumpf [Trumpf, 2013] og IPG laser [IPG, 2013].*

lasereffekten, mens IPG laseren styres vha. et digitalt signal. Kuka robotten kan også styres vha. IPCen, men vil ikke blive anvendt under skæringer i dette projekt. XY-bordet styres af to motorstyringer, som styres af IPCen.



Figur 6.3: *Styringssetup.*

Motorstyingerne er af mærket Kinetix 3 fra Rockwell Automation. Motorstyringerne leverer effekten til motorerne der flytter bordet, og styrer dem vha. et hastighedssignal. Signalet fra IPCen til motorstyringerne er et positionssignal. For at få motorerne til at køre med den ønskede hastighed, er der implementeret en hastighedsregulering i motorstryingerne, mens der er implementeret en positionsstyrring i IPCen, for at give en mere effektiv positionsregulering. Brugen af to reguleringsløkker, kan forringe reguleringen af XY-bordet, hvis disse ikke er indstillet til at arbejde sammen, f.eks. hvis inderløkken har lavere sam-

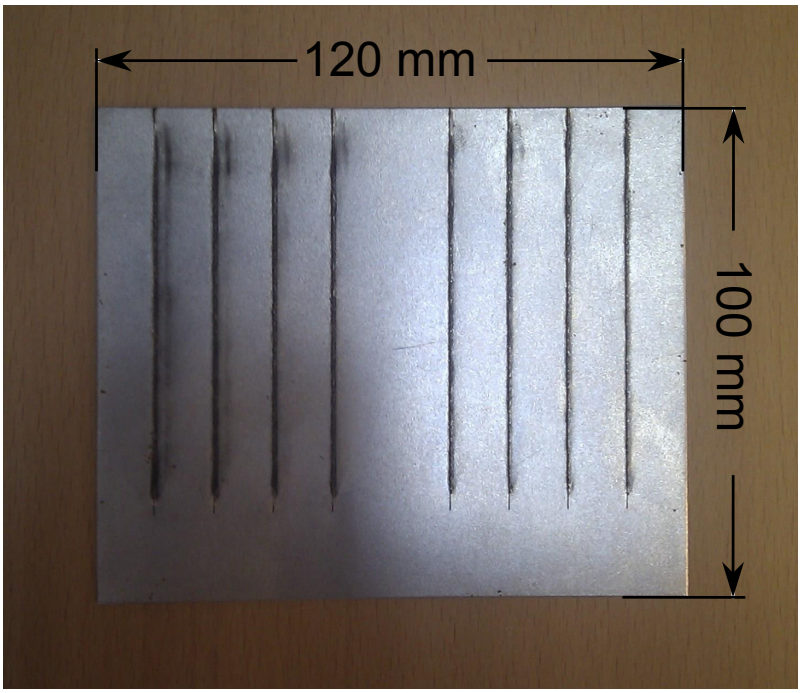
plingsfrekvens end yderløkken.
XY-bordets hastighed og position, er afgørende for, hvor hurtigt arbejdsemnet kan skæres, da et oversving i positionen, vil kunne måles på de geometriske tolerancer for skæreingen. For at bestemme, XY-bordets egenskaber med de givne styringer, er positionen undersøgt for en række hastigheder, se bilag B. Det ses at bordet har et stort oversving ved ændring i hastighed, dette oversving vil dog ikke være noget problem ved forsøgsskæringer, da dette sker ved konstant hastighed.

6.1.1 Kalibrering

Når lasercellen er sat op, kan procesparametrene indstilles. For at kunne indstille procesparametrene er det nødvendig at have et referencepunkt for hver enkel parameter. Referencepunkterne kendes allerede for parametre som pulsfrekvens, bølgelængde og skærehastighed, mens effekten der leveres, ikke er kendt. En omregning fra indstillet effekt på PLCen til leveret effekt fra laseren, indstilling af dyseafstand, samt referencepunkt for fokuslængden er bestemt, og kan findes i bilag C.

6.2 Arbejdsemne

Der skæres i plader af dimensionen 120 mm x 100 mm x 0,5 mm. Et fikstur er designet til fastspænding af pladerne, samt understøtning heraf, da der kan være risiko for at skæregassens tryk kan blæse pladen skæv, samt at pladen deformerer ved opvarmning. Arbejdstegning og billeder af fiksturet forefindes i bilag C. Emnet kan ses på figur 6.4.



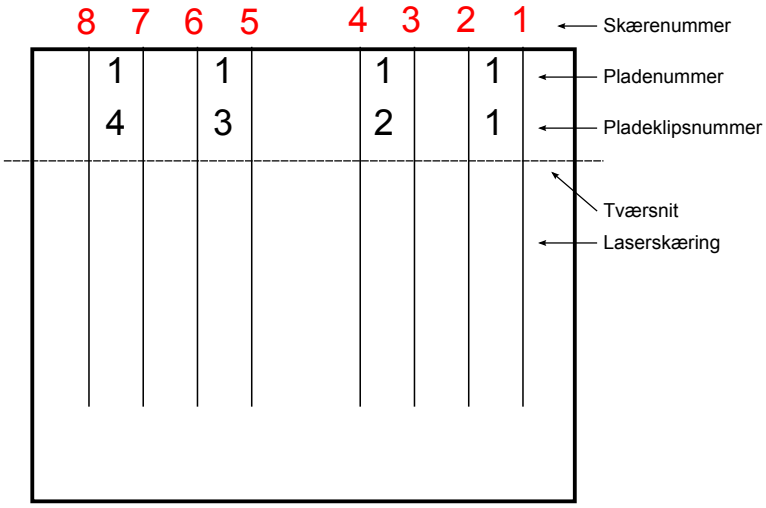
Figur 6.4: *Arbejdsemne med 8 skæringer og geometriske mål.*

Materialet kaldes elektrostål og har betegnelsen M400-50A, og overholder standarden DS/EN 10106

[DS/EN 10106, 2007].

6.3 Laserskæring

For at styre flytningerne af xy-bordet, er der skrevet et program i g-kode, der kan findes på den vedlagte DVD. Der laves 8 skæringer for hver plade. På figur 6.5 ses rækkefølgen for de 8 skæringer. For at få en ensartet skæring, tændes laser og gas 10 mm inden pladen, og derved vil bordet være accelereret op i fart. Når enden af skæringen er nået, slukkes laseren og bordet flyttes tilbage, så næste skæring kan startes. Da hastighedsparameteren er den eneste, der kan ændres under kørsel, vil denne blive ændret mellem skæringerne, mens de andre parametre vil blive ændret mellem pladeskift. Når pladerne er skåret, vil disse blive mærket med pladenummer og skærenummer, herved er alle skæringer mærket individuelt.



Figur 6.5: *Fremgangsmåde for udskæring og nummerering af arbejdsemnerne, samt angivelse af tværsnit til udklipning.*

6.4 Støbning, slibning og polering

Når pladen er skåret, skal pladen deles i mindre stykker, for at være i stand til at behandle skæringerne under mikroskop. Dette gøres ved manuelt at klippe pladen med en Hoan pladesaks, se figur 6.6. Tværsnittet ligger 20 mm fra startkanten, se tvætsnit på figur 6.5, da det derved er muligt at måle skærebredden på den resterende plade, og stadig have skæringer tilbage, ved eventuelle fejl i støbe- eller slibeprocessen. For at kunne analysere tværsnittet af skæringen, er det nødvendigt at slibe og polere emnet. Dette gøres for at fjerne den del af emnet, der er blevet påvirket under udklipningen.
For at opnå de bedste resultater under slibning og polering, er det vigtigt at indstøbningsmaterialet, og de skårne emner er af samme hårdhed. Da elektrostål, er tæt på rent jern, er dette forholdsvis blødt. For at eftervise dette er der foretaget en Vickers hårdhedsprøve, der viste en hårdhed på 120 HV. På baggrund af hårdheden anvendes indstøbningsmaterialet Mounting Resin-6. Emnerne varmindstøbes under tryk, ved brug af udstyret vist på figur 6.7 fra Struers. For at sikre at de skårne emner fastholdes under vamestøbningen, monteres disse i et plastfikstur. Processen kan ses på figur 6.8. Der benyttes ca. 15 g Mounting

Resin-6, som sammen med de skårne emner opvarmes i 5 minutter under et tryk på 1 ton. Herefter øges trykket til 3 ton i 1 minut, der slukkes for varmen og apparaturet køles med kølevand.

Figur 6.6: *Hoan pladesaks.*

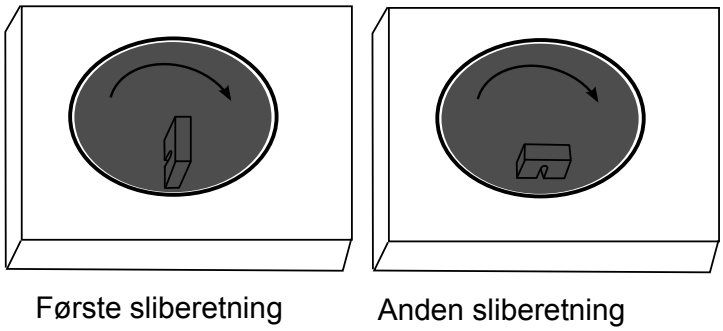
Figur 6.7: *Struers varmestøbning.*

Figur 6.8: *Varmestøbningsprocessen.*

Når emnerne er støbt, er det muligt at slibe og polere dem. For at slibningen og poleringen ikke påvirker resultaterne, skal disse foretages over flere trin, som kan ses i tabel 6.2. Slibningen foregår på et roterende slibeborde. De første 6 trin i behandlingen består af slib med sandpapir, og herefter anvendes industrielle diamanter ved de sidste procestrin. For at være sikker på at slibesporende fra de grovkornede slib, slibes ned ved næste trin, skal der slibes på tværs af foregående sliberetning, som illustreret på figur 6.9. Dette sikres ved brug af et slibestativ der kan holde op til fire slibeemner, og som roterer når slibebordet roterer. Ved polering med diamanter, er det vigtigt, at bevæge emnet, i kontinuere bevægelser, for at diamanterne ikke laver slibespor. Når der skiftes mellem diamantstørrelse, er det vigtigt at skylde emnet med vand, for at der ikke kommer grove diamanter fra emnet, ned i en slibning med finere diamanter.

Trin	Slibeoverflade	Tid
1	Korn 220	ca. 30 sek.
2	Korn 320	ca 2 min.
3	Korn 500	ca 2 min.
4	Korn 800	ca 2 min.
5	Korn 1200	ca 2 min.
6	Korn 2400	ca 2 min.
7	6 μm diamanter	ca. 6 min.
8	3 μm diamanter	ca. 4 min.
9	1 μm diamanter	ca. 2 min.

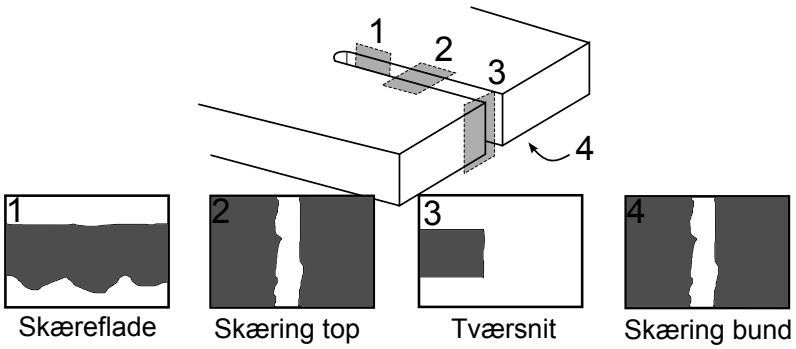
Tabel 6.2: *Forbehandlingstrin for emner til tværsnitsbillede.*



Figur 6.9: *Sliberetningsskift ved slib med sandparpir.*

6.4.1 Billedbehandling

De skårne emner er blevet opmålt under mikroskop. Emnerne undersøges fra 4 vinkler, hvor der tages et billede fra oversiden, undersiden, ind på tværsnittet, og ind på skærefladen som illustreret på figur 6.10.



Figur 6.10: *4 billeder af en skæring som undersøges ved brug af CV.*

Anvendt udstyr og indstillingsparametre til at tage billederne er vist i tabel 6.3.

	Top	Bund	Tværsnit	Skæreflade
Mikroskop	Olympus BX60	Olympus BX60	Leitz metallovert	Leitz metallovert
Optik	LMPlanFI 10x	LMPlanFI 10x	Leitz wetzlar 10x	Leitz wetzlar 10x
Kamera	Leica DFC320	Leica DFC320	Leica DFC320	Leica DFC320
Belysning	underbelysning 9	underbelysning 9	overbelysning	overbelysning
Kamera program	LAS	LAS	LAS	LAS
kamera og billedparametre				
Lukketid (Exposure)	5.0 ms	5.0 ms	2000 ms	2000 ms
Lysstyrke (Gain)	2.5	2.5	1.04	3.7
Farvemætning (Saturation)	1	1	0.6	0.8
Kontrast (Contrast)	0.5	0.5	0.3	0.6

Tabel 6.3: *Udstyr og parametre for billederne.*

6.5 Opmåling

Når billederne af de 4 vinkler er indsamlet, kan opmålingen af de valgte parametre fra afsnit 5 startes. Det er valgt at anvende kodesproget Python og CV biblioteket OpenCV. Der er designet og udviklet programmer til opmåling af skærebredden ved top og bund, vinkelrethed, og hjørnetolerancen for top og bund. Opmålingen af skæg er foretaget manuelt ved brug af programmet ImageJ, hvor længden er målt i pixels, og omregnet til mikrometer. Programmerne kan findes på den vedlagte DVD G. Yderligere forefindes pseudo kode og en gennemgang af programmerne i bilag E.

6.6 Database

Når opmålingerne er foretaget, skrives måleparametrene direkte i en database, der er opbygget i Excel. Det er valgt at bruge Excel, da det er muligt at skrive til Excel fra Python vha. biblioteket OpenPyXL. Der skrives til databasen over 2 gange, ved udførsel af forsøg og ved opmåling:

Udførsel af forsøg indskrives procesparametrene i databasen, for de udførte forsøg. Det er valgt at vente med at indskrives procesparametrene, for et givent forsøg til det er udført, da det derved undgås at indskrive forsøg der ikke er blevet udført.

Opmåling af kvalitetsparameter sker af 4 gange, som beskrevet i afsnit 6.5. De 3 gange, hvor der anvendes CV, indskrives målingerne automatisk i databasen, mens måling af skæg indskrives manuelt.

Under indskrivning til databasen, frasorteres de forsøg, hvor der er fortaget en svejsning, frem for en skæring.

6.7 Indledende forsøg

Der er findes forskellige måder at optimere den tid der anvendes ved udførslen af eksperimentelle forsøg. I projekt udføres indledende forsøg, efterfulgt af Taguchi-metoden, da det derved er muligt at maksimere udbyttet af den anvendte arbejdstid. Taguchi-metoden er beskrevet i afsnit 6.8. Dette afsnit beskriver hvorfor de indledende forsøg er udført, og hvilke resultater det gav. Indledende forsøg udføres som en faktor af gangen forsøg (OFAT)[Montgomery, 2013], da denne metode ser bort fra vekselvirkninger og derfor kan der ændres på en parameter af gangen. Hvis parameterrummet var 3^9 ville dette betyde 27 forsøg med OFAT, men 19683 forsøg ved fuldfaktorforsøg. Diskretiseringen af parametrene for forsøgene er et blandet niveau forsøg, da nogle parametre er diskretiseret på bagrund af begræsninger for laserens setup. Da det ønskes at opnå den bedst mulige skæring, ved så høj hastighed som muligt, vil parameterrummet blive undersøgt med dette som formål. Diskretiseringen af parametrene, er foretaget så disse spænder over det størst mulige parameterrum og kan indsnævres, frem for at udvide.

Hastighed Der foretages 8 udskæringer på hver plade, som vist på figur 6.5, med stigende hastighed. Systemet kan accelerere til en hastighed på 25.000 mm/min, således diskretiseres hastigheden i 8 inkrementer af 3125 mm/min. Det er valgt at have 8 niveauer for hastigheden da denne parameter kan indstilles automatisk mellem skæringenerne. Yderligere er denne parameter interessant at undersøge, da der ved produktion ønskes at overholde en række kvalitetskrav, og derpå skære så hurtig som muligt. Hastigheden diskretiseredes i 8 inkrementer [3125 mm/min, 6250 mm/min, 9375 mm/min, 12500 mm/min, 15625 mm/min, 18750 mm/min, 21875 mm/min, 25000 mm/min].

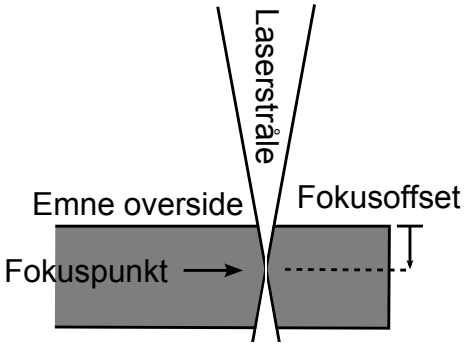
Effekt Udgangspunktet for effekten var følgende diskretisering [250 W, 500 W, 700 W] som efterfølgende ændredes til [250 W, 380 W, 500 W]. Da der ved skæringer med 500 W og høj hastighed var en tendens til, at skæringerne var gennemskåret. Derved reduceredes effekten for at finde grænsen i parameterrummet, hvor skæringerne ikke var gennemskåret.

Gastryk Gastrykket diskretiseredes til [2, 10, 15], da et minumum tryk på 2 bar, er nødvendigt for at beskytte linsen, gastrykket gav ikke synlige kvalitetsforskelle. Ved benyttelse af Nitrogen som skæregas benyttes typisk et gastryk på 10-20 bar [Steen og Mazumder, 2010]. Brugen af skæregas er bekostelig, og et lavt gastryk vil minimere denne udgift.

Fokusoffset Fokusoffsettet diskretiseredes til [0 mm, -1 mm, -2 mm]. Værdierne er valgt således fokus flyttes ned gennem pladen, hvor 0 repræsenterer et fokus på pladens overside, som vist på figur 6.11. Under indskydningen i kapitel C tydeliggjordes det, at ændringen i strålediameteren var ubetydelig ved blot en forskydning på -0.5 mm, således at fokuspunktet lå på undersiden. Således ligges fokuspunktet under pladen, eftersom det er påvist at et fokuspunkt på undersiden af pladen kan reducere skærebredden [Ghany og Newishy, 2005]. Diskretiseringen af fokusoffesettet gav ingen synlige kvalitetsforskelle.

Dysediameter Dysediameteren diskretiseredes til [0,8 mm, 1,2 mm, 2,5 mm], da disse er tilrådighed, dysediameteren gav ikke synlige kvalitetsforskelle.

Pulsering Pulstiden og pulspausen indstilledes først til hhv. [1 ms, 2 ms, 3 ms] og [0 ms, 1 ms, 2 ms] dette viste sig at lave huller i stedet for at skære. Da det ikke er muligt at pulse hurtigere, end hvad der er valgt, kan hastigheden sænkes. Derfor blev hastigheden for disse forsøg ændret til [280 mm/min, 560 mm/min, 840 mm/min, 1120 mm/min, 1400 mm/min, 1680 mm/min, 1960 mm/min, 2240 mm/min]. Pulseringen ved lav hastighed viste smalle og gennemskårne skæringer.



Figur 6.11: *Fokusoffset fra toppen af emnet.*

6.8 Eksperimentelt design

Før de eksperimentelle forsøg kan udføres, skal en forsøgsplan designes. Som beskrevet i afsnit 6.7 er hastigheden diskretiseret i 8 hastigheder, da denne parameter kan ændres mellem skæringerne. Når de andre procesparametre skal ændres, sker dette manuelt. Hastighedsparameteren holdes derfor udenfor det eksperimentelle forsøgsdesign. De resterende procesparametre beskrevet i afsnit 4, er diskretiseret i 3 niveauer, og efter de indledende forsøg er der opstillet en parametertabel for diskretiseringen, som vist i tabel 6.4.

	Niveau		
Parameter	1	2	3
Effekt (W)	250	380	500
Tryk (bar)	2	10	15
Fokusoffset (mm)	0	-1	-2
Dysediameter (mm)	0.8	1.2	2.5
Pulstid(ms)	1	2	3
Pulspause (ms)	0	1	2

Tabel 6.4: *Parameterdiskretisering til faktorforsøg.*

Hvis der vælges et fuldt faktordesign, som beskrevet i kapitel 3, vil dette give 3^6 forsøg, svarende til 729 forsøg. De 729 forsøg giver 8 skæringer pr. forsøg, og derfor vil der være 5832 skæringer, der alle skal behandles som beskrevet i afsnit 6.4. Det er vurderet, at det vil være for tidskrævende at gennemføre et fuldfaktorforsøg, og derfor er det bestemt at anvende fraktionsmetoden - Taguchi-metoden [Juang og Tarng, 2002], for at få mest mulig information i forhold til antal forsøg.

Taguchi metoden anvender ortogonale arrays for systematisk at komprimere parameterrummet. Ved valg af ortogonalt array er det vigtigt at vælge en størrelse, der er højere end eller lig med den frihedsgrad parameterrummet har [Juang og Tarng, 2002]. Dette parameterrum har en frihedsgrad på $3 \cdot 6$ svarende til en frihedsgrad på 18. Der vælges et ortogonal array på L_{27} (3^6), som kan ses på figur 6.5.

Under udførsel af de indledende forsøg, blev det gjort klart at de valgte hastigheder til kontinuerlig laserskæring, var for høje til de valgte pulsværdier, det var derfor nødvendigt at stoppe forsøgene, og genoptage skæringen med puls senere. Udfaldet af denne afbrydelse af de eksperimentelle forsøg, var at ikke alle forsøg blev gennemført, og grundet mangel på tid ikke er blevet gjort færdig, men derimod blev der indsamlet

Forsøg	Effekt (W)	Tryk (bar)	Fokusoffset (mm)	Dysediameter (mm)	Pulstid (ms)	Pulspause (ms)
1	250	2	0	0.8	1	0
2	250	2	0	0.8	2	1
3	250	2	0	0.8	3	2
4	250	10	-1	1.5	1	0
5	250	10	-1	1.5	2	1
6	250	10	-1	1.5	3	2
7	250	15	-2	2.5	1	0
8	250	15	-2	2.5	2	1
9	250	15	-2	2.5	3	2
10	380	2	-1	2.5	1	1
11	380	2	-1	2.5	2	2
12	380	2	-1	2.5	3	0
13	380	10	0	0.8	1	1
14	380	10	0	0.8	2	2
15	380	10	0	0.8	3	0
16	380	15	-2	1.5	1	1
17	380	15	-2	1.5	2	2
18	380	15	-2	1.5	3	0
19	500	2	-1	1.5	1	2
20	500	2	-1	1.5	2	0
21	500	2	-1	1.5	3	1
22	500	10	-2	2.5	1	2
23	500	10	-2	2.5	2	0
24	500	10	-2	2.5	3	1
25	500	15	0	0.8	1	2
26	500	15	0	0.8	2	0
27	500	15	0	0.8	3	1

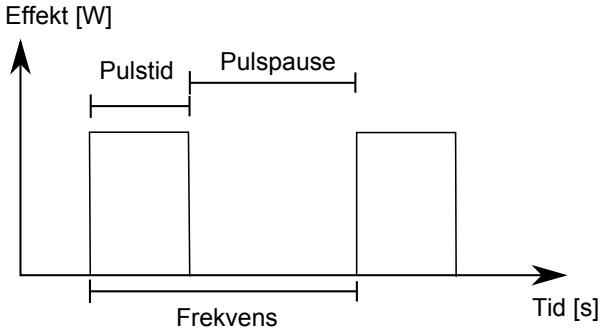
Tabel 6.5: *L_{27} ortogonalt array indeholdende procesparameterindstillinger for 27 forsøg.*

data for pulsskæring. De udførte forsøg med kontinuerlig laser kan ses i tabel 6.6.

Forsøg	Effekt (W)	Tryk (bar)	Fokus offset (mm)	Dysediameter (mm)
1	250	2	-1	2.5
2	250	2	-2	0.8
3	250	10	-2	0.8
4	250	10	0	2.5
5	250	15	-2	0.8
6	380	2	-2	0.8
7	380	2	-1	2.5
8	380	10	0	2.5
9	380	10	-2	0.8
10	380	15	-2	0.8
11	500	2	-2	0.8
12	500	10	0	2.5
13	500	10	-2	0.8
14	500	15	-2	0.8

Tabel 6.6: *Procesparametre for udførte forsøg med kontinuerlig stråle.*

For at undersøge pulsparametrene pulstid og pulspauses indflydelse, og vekselvirkning med hastigheden samt effekten, udførtes forsøg med kun disse procesparametre som designparametre. Se pulstid og pulspause på figur 6.12. Effekten ville have indflydelse på hvor meget energi, der vil blive leveret under en pulsering. Hastigheden vil ligeledes have indflydelse på mængden af leveret energi. De resterende procesparametre blev holdt konstante, og kan ses i tabel 6.7. Som beskrevet i afsnit 6.7, blev hastighederne reducerede, og vil stadig blive diskretiseret i 8 inkrementer, mens pulstiden, og effekten diskretiseres i 3, og pulspausen i 2 niveauer. Dette giver 18 plader, med 8 hastigheder på hver, som giver 144 skæringer. Da de variable parametre, er forholdsvis hurtige at omstille, er det valgt at køre et fuldfaktorforsøg. Det eksperimentiele design kan ses i tabel 6.8.



Figur 6.12: *Illustation af pulstid og pulspause.*

Tryk (bar)	Fokusoffset (mm)	Dysediameter (mm)
10	0	0.8

Tabel 6.7: *Procesparametre der holdes konstante under pulsforsøg.*

Under udførsel af pulsforsøgene, var det ikke muligt at anvende en pulstid på 1 ms, med en pulspause på

Forsøg	Pulstid (ms)	Pulspause (ms)	Effekt (W)
1	1	1	250
2	2	1	250
3	3	1	250
4	**1**	**2**	**250**
5	2	2	250
6	3	2	250
7	1	1	380
8	2	1	380
9	3	1	380
10	**1**	**2**	**380**
11	2	2	380
12	3	2	380
13	1	1	500
14	2	1	500
15	3	1	500
16	**1**	**2**	**500**
17	2	2	500
18	3	2	500

Tabel 6.8: *Procesparametre anvendt under pulsforsøg.*

2 ms. Derfor er disse ikke blevet udført, og er markeret i tabel 6.8.

Indstillingen af procesparametrene under de indledende forsøg, og resultaterne for kvalitetsparametrene derfra, kan findes på den vedlagte DVD G.

Grundet afbrydelsen af Taguchi-forsøgene, er dette blevet et stærkt reduceret faktorforsøg, mens de udførte pulsforsøg antages at være fuldfaktor forsøg, selv med de 3 manglende forsøg. De udførte forsøg undersøges analytisk, for at undersøge sammenhængene mellem procesparametre og kvalitetsparametre, og derved give et sammenligningsgrundlag for den empiriske model.

7 Statistisk analyse af data

For at undersøge hvordan de forskellige proces- og kvalitesparametre vekselvirker og deres indbyrdes betydning, benyttes variansanalyse (ANOVA)[Montgomery, 2013]. Hovedeffekterne mellem proces- og kvalitesparametre bestemmes, for både fuldfaktor puls effekt forsøgene, og de stærkt reducerede kontinuerlige effekt forsøg. Når hovedeffekterne er undersøgt, vil vekselvirkninger for procesparametrene blive bestemt for fuldfaktor puls effekt forsøgene. Fremgangsmåden og ANOVA tabeller kan findes i bilag D.

7.1 Hovedeffekter

ANOVA er en analysemetode, der anvendes til at afvise en hypotese. I dette tilfælde er hypotesen, at gennemsnittet af kvalitetsparametrene i de enkelte eksperimenter er ens. Hvis denne hypotese er sand, vil ændringen af en given procesparameter ikke have nogen indvirkning på en given kvalitetsparameter. Hypotesen kan opskrives på følgende måde:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = ... = \mu_a \tag{7.1}$$

$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \tag{7.2}$$

Hvor a er antal eksperimenter, i og j er to tilfældige eksperimenter, og μ er gennemsnittet af kvalitetsparametrene for et eksperiment. En opsummering af resultaterne fra ANOVA metoden kan ses i tabel 7.1 og 7.2. I tabellerne er sandsynligheden, for at hypotesen er sand, vist i procent.

Der er bestemt en grænseværdi på 5 %, for at afvise hypotesen, og derved angiver værdier lavere end 5 % en sammenhæng mellem procesparametre, og kvalitetseparametre. Hvor der er en sammenhæng mellem procesparametre og kvalitetsparametre, er procentsatsen markeret med fed i tabel 7.1 og tabel 7.2.

For at verificere sammenhængen mellem procesparametrene og kvalitetsparametrene sammenlignes resultaterne fra ANOVA, med tabel 5.3. Denne tabel indeholder et sammendrag af publicerede erfaringer om sammenhænge mellem laserskæringsprocesparametre og kvalitetsparametre. Vinkelretheden viste ingen sammenhæng med nogle af de udvalgte procesparametre, og ingen af de udvalgte referenceprojekter fra tabel 5.3 anvendte denne kvalitetsparameter. Vinkelretheden er præsenteret af standarden, beskrevet i afsnit 5, hvor denne standard beskriver termisk skæring i plader fra en tykkelse på 0,5 mm. Det må derfor formodes at der kunne findes en sammenhæng mellem denne og nogle procesparametre ved skæring i tykkere plader. Ingen af de undersøgte referencer har undersøgt kvalitetsparametrene hjørnetolerance top og hjørnetolerance bund. Det var forventet at gastrykket ville have en påvirkning på hjørnetolerancerne, da det er formodet at gastrykket ville blæse smelten væk. Det ses at gastrykket kun har en påvirkning af hjørnetolerancen for bunden, og ikke i toppen, i det procesparameterrum der er undersøgt. I tabel 5.3

Puls effekt forsøg						
	Skæg	Skærebredde top	Skærebredde bund	Hjørnetolerance top	Hjørnetolerance bund	Vinkelrethed
Pulstid	10,28 %	**0,00 %**	**0,04 %**	**4,29 %**	30,67 %	22,09 %
Pulspause	**1,56 %**	**0,82 %**	**0,33 %**	35,41%	53,73 %	78,59 %
Effekt	17,08 %	**0,00 %**	**0,00 %**	62,46%	**0,35 %**	69,98 %
Hastighed	**0,30 %**	**0,00 %**	**0,00 %**	81,18%	52,27 %	52,78 %

Tabel 7.1: *Procentvis sikkerhed for at der ikke er en sammenhæng mellem procesparametre og kvalitetseparametre, for forsøg med pulsering.*

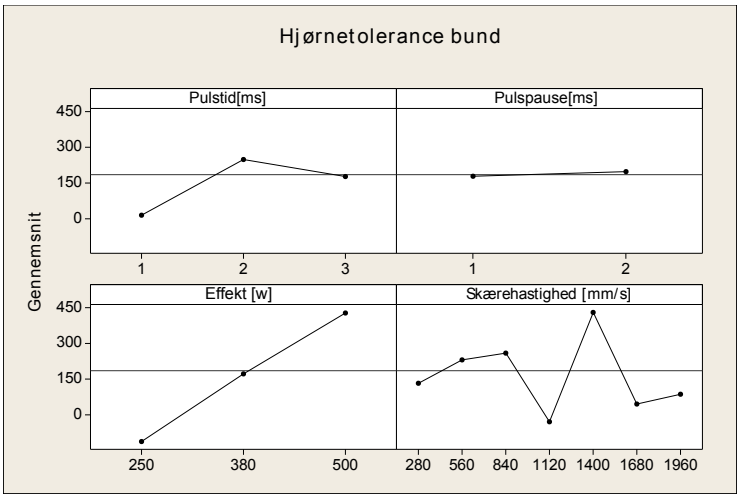
Kontinuerlig effekt forsøg						
	Skæg	Skærebredde top	Skærebredde bund	Hjørnetolerance top	Hjørnetolerance bund	Vinkelrethed
Dysediameter						
Fokuspunkt	55,71 %	**0,21 %**	19,83 %	**4,69%**	32,04 %	87,26 %
Gastryk	**0,00 %**	66,19 %	**0,00 %**	56,11%	**0,00 %**	40,53 %
Effekt	85,46 %	**0,00 %**	**0,06 %**	11,09%	41,12 %	23,88 %
Hastighed	81,36 %	**0,00 %**	18,97 %	59,38%	**1,51 %**	93,04 %

Tabel 7.2: *Procentvis sikkerhed for at der ikke er en sammenhæng mellem procesparametre og kvalitetsparametre, for forsøg med kontinuerlig effekt.*

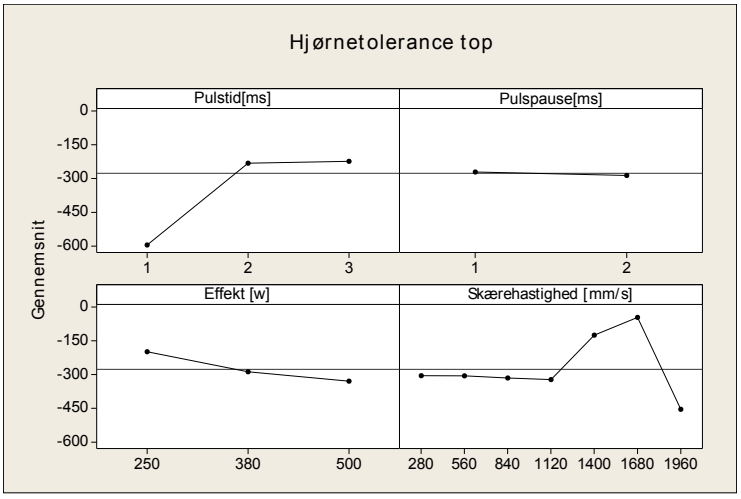
er fundet en sammenhæng mellem skæg og procesparametrene pulstid, pulsfrekvens og dyseafstand. Det vil formodes at der også ville være en sammenhæng mellem gastryk og skæg, da gastrykket i skæringen afhænger dyseafstanden. De udførte forsøg viste den formodede sammenhæng mellem skæg og gastryk, samt pulspause og hastigheden ved pulserede effekt forsøg.

Efter at have fundet sammenhænge mellem procesparametre og kvalitetsparametre, undersøges hvordan procesparametrene påvirker kvalitetsparametrene. Når der anvendes et stærkt reduceret faktorforsøg, som der er gjort for forsøgene med kontinuerlig effekt, er en af antagelserne for at være i stand til at analysere hovedeffekterne, at procesparametrenes vekselvirkninger ikke er ulineære [Montgomery, 2013]. Laserskæringsprocessen er en yderst ulineær proces [Steen og Mazumder, 2010], og der er derfor ikke en tilstrækkelig mængde forsøg til at kunne se vekselvirkninger mellem procesparametrene og hovedeffekterne af procesparametrene. Forsøgene med pulserende effekt er fuld faktorforsøg, og disse analyseres derfor for vekselvirkninger og hovedeffekter i det efterfølgende. Gennemsnittet for hver procesparameterniveau er udregnet for hver kvalitetsparameter, og derved findes hovedeffekterne. Fra hovedeffekterne

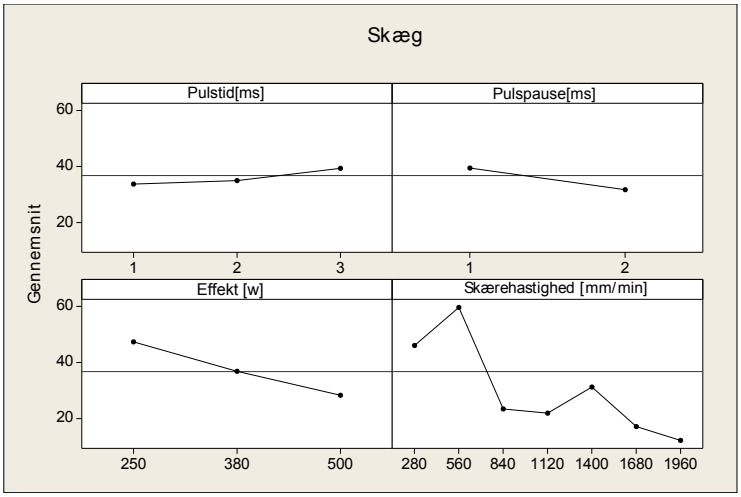
er det muligt, at sammenligne effekten af ændringer i procesparameterniveauet. Figur 7.1 til 7.5 viser hovedeffekterne for forsøgene med pulserende effekt.



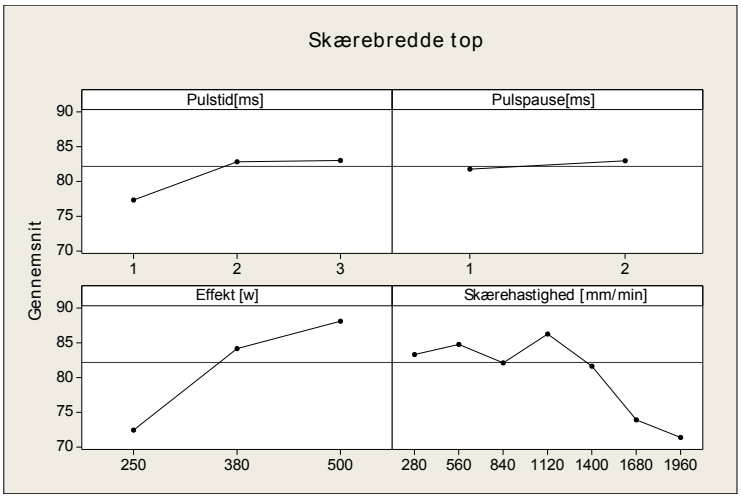
Figur 7.1: *Hovedeeffekterne for hjørnetolerance bund for puls forsøg.*



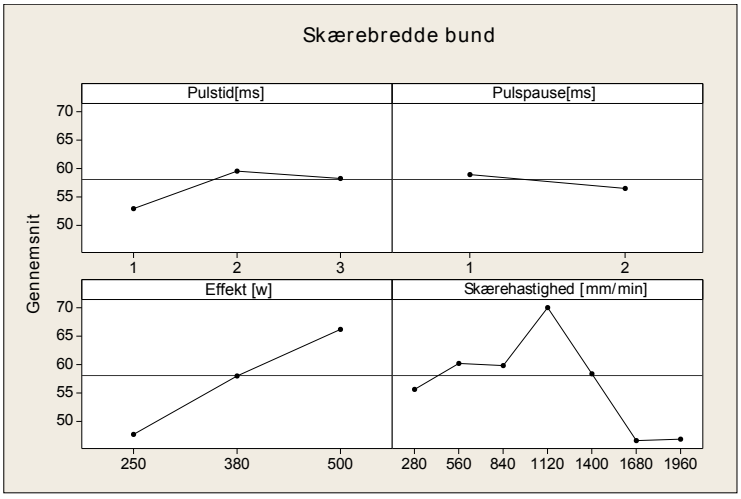
Figur 7.2: *Hovedeeffekterne for hjørnetolerance top for puls forsøg.*



Figur 7.3: *Hovedeeffekterne for skæg for puls forsøg.*



Figur 7.4: *Hovedeeffekterne for skærebredde top for puls forsøg.*



Figur 7.5: *Hovedeeffekterne for skærebredde bund for puls forsøg.*

Skæg. For skæg var det kun pulspause og hastighed der havde en indvirkning. Ved at se på figur 7.3 kan det ses, at ved at øge hastigheden og sænke pulspausen, minimeres mængden af skæg. Ud af de to procesparametre, er det hastigheden der har den største effekt på skæg, i det parameterrum der er valgt.

Skærebredde top og bund. For de to skærebredder havde alle procesparametre, en indvirkning. Ved at se på figur 7.4 og 7.5, ses det at indvirkningen af procesparametrene næsten er ens for de to kvalitetsparametre. Det ses at pulspausen har en minimal indvirkning, i det anvendte parameterrum, mens en reduktion af pulstiden og effekten vil give en mindre skærebredde, og en forøgelse af hastigheden vil give mindre skærebredde. Det kan ses at effekten og hastigheden har en betydeligt større indflydelse på skærebredden, frem for pulstiden og pulspausen, i det undersøgte parameterrum. Hastigheden giver en markant forøgelse af skærebredden ved hastigheder omkring 1120 mm/min. Dette kan skyldes en vekselvirkning mellem procesparametrene, og vil blive undersøgt i afsnit 7.2.

Hjørnetolerance top. For hjørnetolerancen i toppen var det kun pulstiden der havde en indvirkning. Ved at se på figur 7.2 ses det, at ved en lav pulstid fås en stor afrunding af hjørnet, mens ved højere pulstid fås mindre afrunding af hjørnet, i det parameterrum der er valg.

Hjørnetolerance bund. For hjørnetolerancen i bunden var det kun effekten der havde en indvirkning. Ved at se på figur 7.1 ses det, at effekten har stor indvirkning på hjørnetolerancen, og skal minimeres i det anvendte parameterrum for at hjørnetolerancen ligger omkring 0.

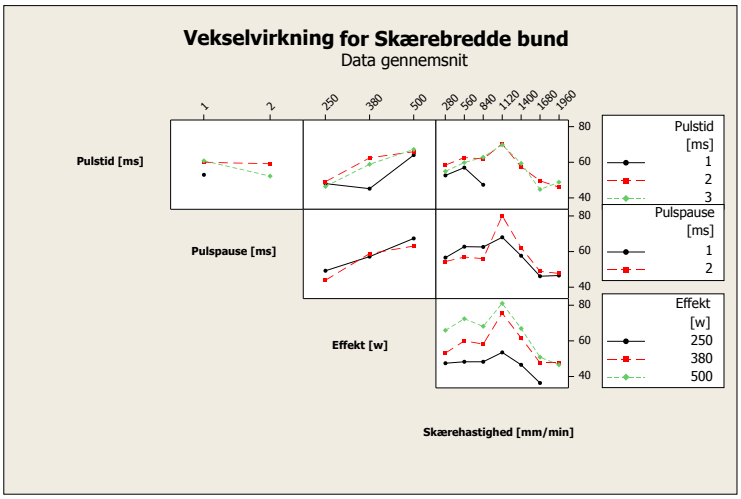
7.2 Vekselvirkninger

Som for hovedeffekterne vil det blive bestemt hvilke vekselvirkninger, hvilke der har påvirkning på kvalitetsparametrene. Der er opstillet en hypoteste, om at vekselvirkningerne mellem procesparametrene ikke har en påvirkning af gennemsnittet af kvalitetsparametrene for et eksperiment. ANOVA anvendes igen, og resultaterne heraf kan findes i bilag D. En opsumering af resultaterne kan ses i tabel 7.3.

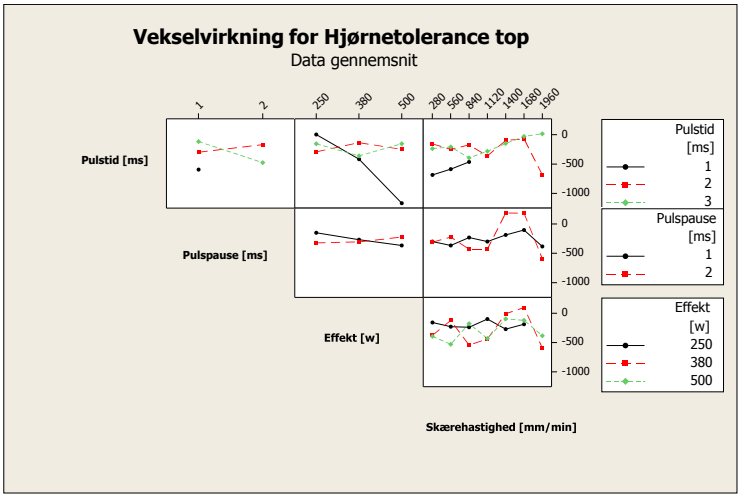
Vekselvirkninger ved puls effekt forsøg						
	Skæg	Skærebredde top	Skærebredde bund	Hjørnetolerance top	Hjørnetolerance bund	Vinkelrethed
Pulstid*Pulspause	55,32 %	8,89 %	5,13 %	21,49 %	90,87 %	16,89 %
Pulstid*Effekt	93,84 %	6,49 %	**0,71 %**	**1,16 %**	10,23 %	31,47 %
Pulstid*Hastighed	92,20 %	36,70 %	**0,42 %**	60,44 %	23,01 %	32,24 %
Pulspause*Effekt	71,59 %	88,67 %	36,25 %	77,72 %	47,85 %	58,33 %
Pulspause*Hastighed	91,19 %	63,82 %	**0,52 %**	88,79 %	47,29 %	25,21 %
Effekt*Hastighed	51,11 %	78,04 %	**4,91 %**	60,53 %	24,89 %	23,98 %

Tabel 7.3: *Procentvis sikkerhed for at der ikke er en sammenhæng mellem procesparametre og kvalitetseparametre, for vekselvirkninger, for forsøg med pulsering.*

Der er bestemt en grænseværdi på 5 % for at afvise hypotesen, og derved angiver værdier lavere end 5 % en sammenhæng mellem vekselvirkene procesparametre og kvalitetseparametre. Hvor der er en sammenhæng, er procentsatsen markeret med fed i tabel 7.3. De vekselvirkende procesparametre sammenlignes på figur 7.6 og 7.7, for hhv. skærebredden bund og hjørnetolerancen top.



Figur 7.6: *Vekselvirkninger for Skærebredde bund.*



Figur 7.7: *Vekselvirkninger for hjørnetolerancen top.*

På figur 7.7, kan det ses at effekten og pulstiden vekselvirker, og hvis pulstiden er 2 ms eller 3 ms, har effekten den samme påvirkning på hjørnetolerancen. Hvis pulstiden indstilles til 1 ms, får effekten en betydning for hjørnetolerancen, dvs. hvis det ønskes ikke at have en påvirkning af hjørnetolerancen når der ændres på effekten, skal pulstiden indstilles til 2 ms eller 3 ms, gældende for det undersøgte parameterrum.

På figur 7.6 ses de 4 vekselvirkninger mellem procesparametrene, for kvalitetsparameteren skærebredde bund. Vekselvirkningerne er som følgende:

Pulstid og effekt giver en afvigelse ved en effekt på 389 W og en pulstid på 1 ms, hvor der ses en lavere

skærebredde for bunden end ved de andre kombinationer.

Pulstid og hastighed giver et markant fald i skærebredden for bunden, ved en pulstid på 1 ms, og ved de høje hastigheder kan det ses, at der ikke er opnået en gennemskæring ved 1 ms pulstid. Dette skyldes manglende datapunkter. Ved lang pulstid, kan der opnås en høj skærehastighed.

Pulspause og hastighed giver en markant forøgelse af skærebredden, ved en pulspause på 2 ms, og en hastighed omkring 1120 mm/min. Hvis der skæres med en pulspause på kun 1 ms, ville dette give en mere lineær sammenhæng mellem skærehastighed og skærebredden for bunden.

Effekt og hastighed giver en dæmpning af ændringen, af skærebredden ved forskellige hastigheder, hvis effekten sættes til 250 W.

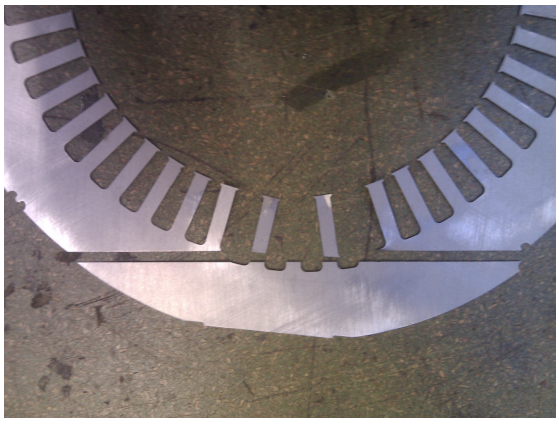
Mængden af vekselvirkning mellem procesparametrene var relativt lav i forhold til hovedeffekterne, dette er fordelagtigt, da vekselvirkninger mellem procesparametrene, kan give en slørende virkning på hovedeffekterne. Hvis der er mange vekselvirkninger med høj effekt, kan det blive intuitivt svært at gennemskue sammenhængen mellem procesparametre og kvalitetsparametre, og det er derfor nødvendigt at gennemføre en vekselvirkningsanalyse som ovenfor [Montgomery, 2013].

Analyse af Grundfos' statorlamel

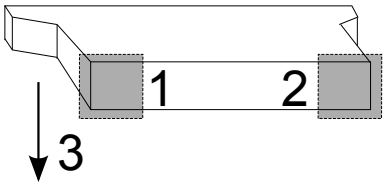
8

Som beskrevet i indledningen i kapitel 1, er Grundfos interesseret i at undersøge, om laserskæringen kunne være en alternativ proces til stansning, ved fremstilling af statorlameller. For at undersøge dette, er der fremskaffet to statorlameller, fra en MG180 Grundfos motor, hvor den ene er en stanset statorlamel mens den anden er en laserskåren statorlamel. Lamellernes geometri er identisk med undtagelse af tykkelsen, og kan ses på arbejderstegningen i bilag F. Det stansede emne har en pladetykkelse på 0,5 mm, mens det laserskårne har en tykkelse på 0,3 mm. Tykkelsesforskellen skyldes at Grundfos kun laserskærer prototyper, og dette var derfor den geometri der var nærmest den stansede geometri. Grundfos er interesseret i at undersøge om et laserskåret emne, har den kvalitet som et stanset emne, og specielt om der findes en forskel i de magnetiske egenskaber, da permeabiliteten vil have en indflydelse på en elmotors effektivitet. Da det ikke er muligt at måle f.eks. flux eller permeabilitet i dette projekt, er en række andre egenskaber, der indirekte siger noget om de magnetiske egenskaber, blevet undersøgt. Følgende punkter vil blive undersøgt, for det stansede og laserskårne Grundfos emne:

- Geometri af tværsnit
- Materialets hårdhed
- Kornstruktur

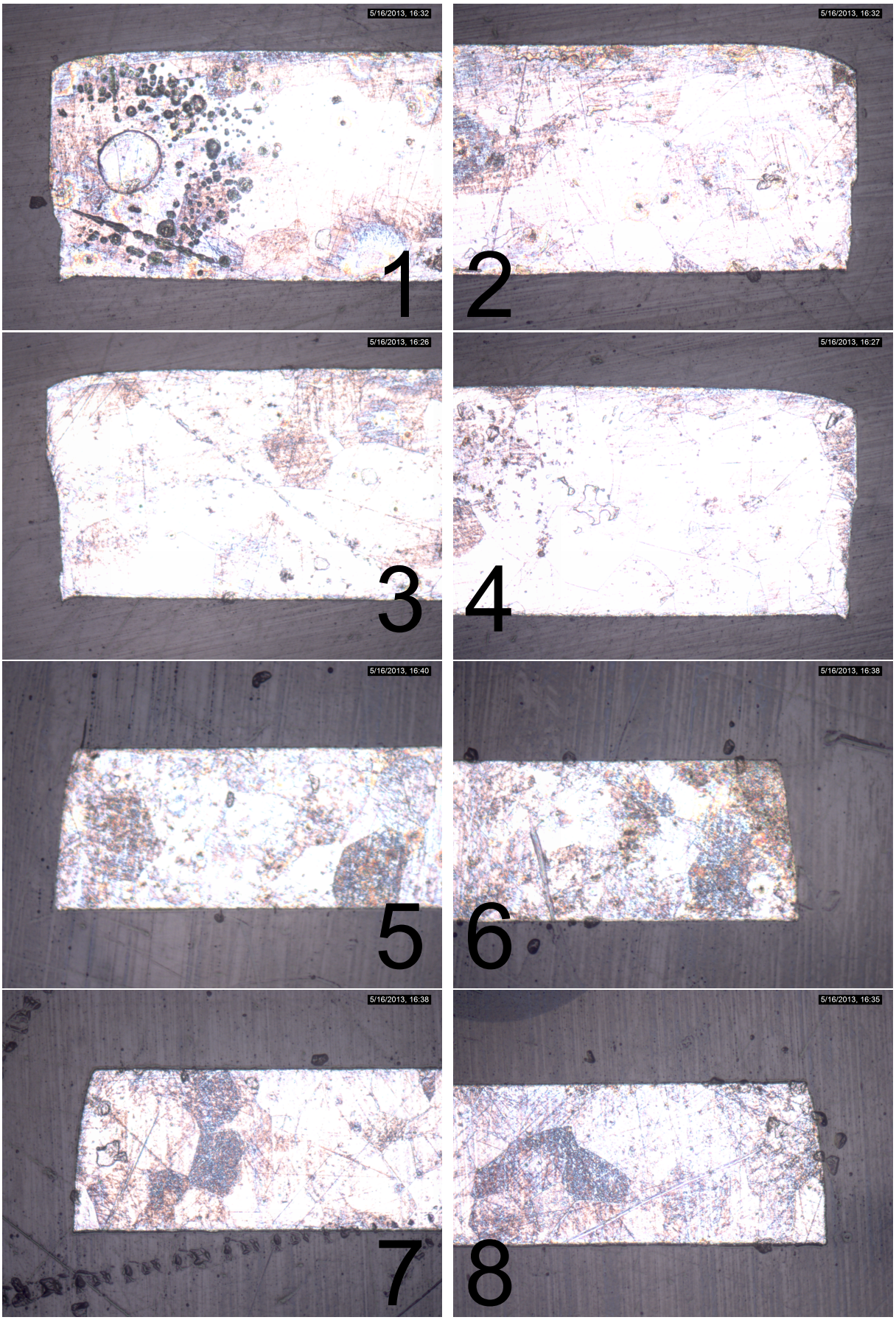


Figur 8.1: *Udklipning af Grundfos stator.*



Figur 8.2: *1 og 2 repræsenterer mikroskop billeder. 3 repræsenterer laserskærings- og stanseretningen.*

For at være i stand til at undersøge statorlamellerne, er disse blevet klippet op som vist på figur 8.1. De udklippede emner blev støbt, slebet og poleret som beskrevet i afsnit 6, for herefter at kunne blive analyseret under mikroskop. Mikroskopbillederne kan ses på figur 8.3.



Figur 8.3: *1,2,3,4: Stansede emner. 5,6,7,8: Laserskårne emner.*

Kant	hjørnetolerance top [μm^2]	hjørnetolerance bund [μm^2]	Vinkelrethed [μm]	Grater [μm]
1 Stanset	-2021	-165	45,4	27,2
2 Stanset	-2009	-318	84,7	6,1
3 Stanset	-1987	-47	56,6	23,8
4 Stanset	-2158	-186	74,4	19,1
Gennemsnit	**-2043,8**	**-179**	**65,27**	**19,1**
Varians	**171**	**271**	**39,3**	**21,1**
5 Laserskåret	-58	-130	74,9	4,7
6 Laserskåret	-67	-255	54,3	4,5
7 Laserskåret	-60	-180	48,6	5,4
8 Laserskåret	-90	-137	50,1	6,3
Gennemsnit	**-68,75**	**-175,5**	**56,97**	**5,23**
Varians	**32**	**125**	**26,3**	**1,8**

Tabel 8.1: *Kvaliteten af Grundfos' laserskårne og stansede statorlamel.*

Figur 8.3 viser 4 kanter fra et laserskåret emne, og 4 kanter fra et stanset emne. For at sammenligne de 8 kanter, er måleparametrene vinkelrethed, hjørnetolerance for top og bund, fra afsnit 5.2 anvendt. Grundfos har et kvalitetskrav for grater efter stansningen, på maksimalt 0,07 mm (70 μm). Graterne for de 4 stansede kanter og skægget for de 4 laserskårne er opmålt og sammenlignet, ved at fitte en lineær linje til bunden af emnet, og herpå måle den vinkelrette afstand ud til spidsen af graten. Resultaterne af disse opmålinger kan ses i tabel 8.1.

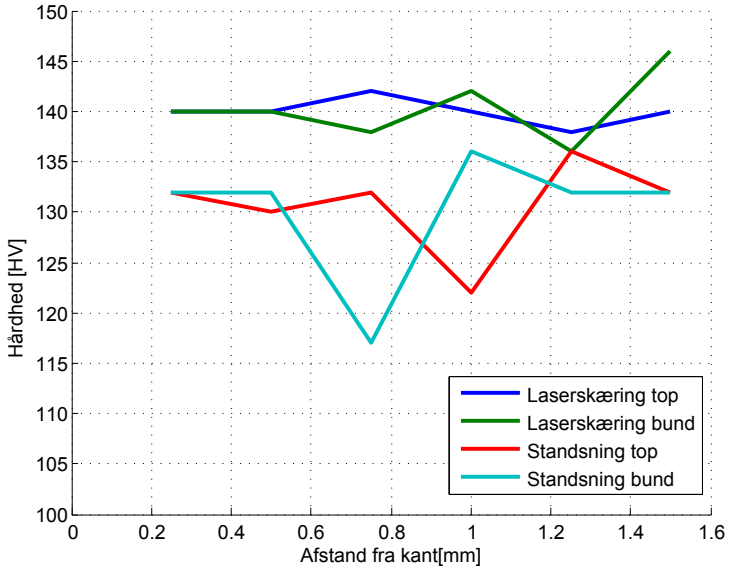
Ud fra tabel 8.1 ses det, at graterne for både laserskæring og stansning overholder kravene, dog er graterne mindre ved laserskæring. Forskellen på hjørnetolerancen i bunden er lille ved laserskæring og stansning, til trods for at hjørnerne har forskellige dimensioner som vist på figur 8.3. Dette skyldes at denne måleparameter er et areal, og derfor kan forskellige værdier af bredden og højden, give det samme areal. Hjørnetolerancen top, er betydeligt større ved stansning end for laserskæring. Dette skyldes at ved stansning får kanten et buk ned af. Det vurderes derfor at hjørnetolerancen top ved laserskæring, er at fortrække. Vinkelretheden ligger i det samme område både for laserskæring og for stansning. Det skal dog nævnes at pladetykkelsen har en indvirkning på dette mål. Da det laserskårne emne er af tykkelsen 0,3 mm, er afstanden kortere hvor vinkelretheden måles over. Det må derfor vurderes at hvis det laserskårne emne var 0,5 mm tykt, ville vinkelretheden være ringere.

For at få så god permeabilitet som muligt, benytter Grundfos et lav kulstofstål, der er meget tæt på rent jern. Statormaterialet skal overholde standarden EN 10106, der angiver et maksimalt kuldstof indhold på 0,12 % i materialet [DS/EN 10106, 2007]. Jern har forskellige atomgitterstrukturer afhængigt af temperaturen. Jern kaldes ferrit i sin koldeste gitterstruktur og en gitterstrukturændring forekommer fra 768 $^{\circ}C$ til 911 $^{\circ}C$, hvorefter det benævnes austenit. Ved ændringen fra ferrit til austenit, forsvinder de magnetiske egenskaber af jernet, mens hårdheden af jernet stiger[Vogel et al., 2009]. Da laserskæringensprocessen er termisk, vil statorlamellen undergå en lokal opvarmning, og der vil derfor opstå austenit lokalt, langs skæringen. For at undersøge om der er en forringelse af de magnetiske egenskaber for statoren, efter laserskæringen, opmåles hårdheden da en forøgelse i hårdheden, vil indikere dannelse af austenit.
For at måle hårdheden, anvendes en Vickers hårdheds test. For at testen er valid, kan der makimalt måles

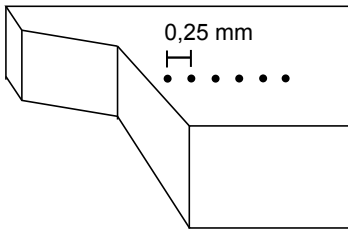
Afstand fra kant [mm]	0,25	0,50	0,75	1	1,25	1,50
Stanset top [HV]	132	130	132	122	136	132
Stanset bund [HV]	132	132	117	136	132	132
Laserskåret top [HV]	140	140	142	140	138	140
Laserskåret bund [HV]	140	140	138	142	136	146

Tabel 8.2: *Hårdhedstabel for laserskåret og stanset emne. Afstanden er fra den skårne kant. Hårdheden er målt på top og bund af emnerne.*

0,25 mm tæt på kanten, for et materiale af denne hårdhed[Vogel et al., 2009]. Der måles i intervaller af 0,25 mm fra kanten og ind mod midten af pladen, se figur 8.5. Da varmepåvikningen kan være forskellig mellem toppen og bunden af pladen, laves testen for både toppen og bunden. Testen foretages også for det stansede emne. Resultaterne kan ses i tabel 8.2, og på figur 8.4.



Figur 8.4: *Hårdheden målt fra den laserskårne og stanset kant. Målt på top og bund.*

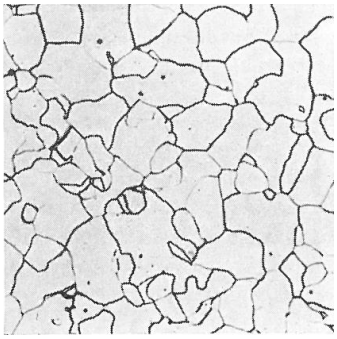


Figur 8.5: *De 6 punkter hvor hårheden er målt på toppen. Mållingerne for bunden er udført på samme positioner.*

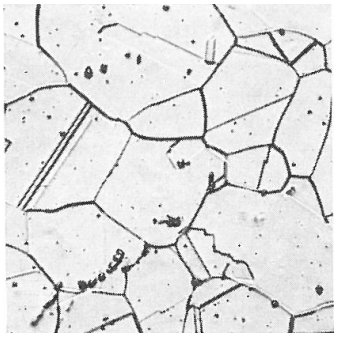
Ud fra hårdhedsanalysen kan det ses et lille udslag i hårdheden, hvis dette ville skyldes dannelse af austenit, ville hårdheden være markant højere ved kanten end inde i emnet. Der kan ses en forskel i hårdheden mellem det laserskårne og stansede emne. Det antages at dette ikke skyldes de to processer, men derimod, en forskel i materialerne. Materialet er fremstillet vha. valsning, og derfor kan det være svært at tage højde

for spændinger i valseretningen, dette kan forsage forskellen i hårdheden.

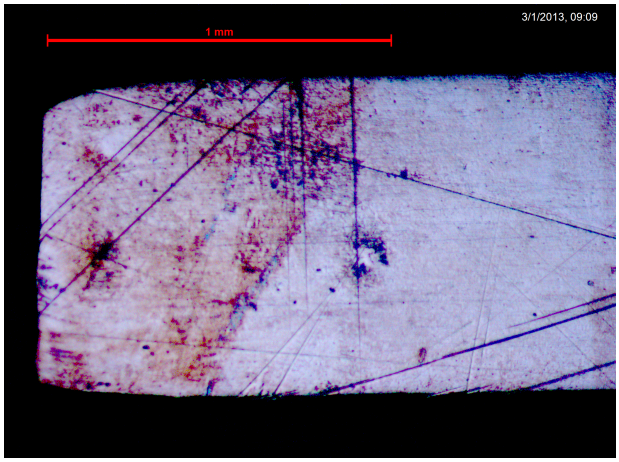
Da hårdhedsanalysen ikke gav nogen indikation på dannelsen af austenit, er kornstrukturen blevet undersøgt. Det vides fra skæring i aluminium at det er muligt at se den varmepåvirkede zone, ved visuel inspektion under mikroskop, se figur 8.8. For at have et sammenligningsgrundlag, sammenlignes der med billeder på figur 8.6 og figur 8.7.



Figur 8.6: *Ferrit. Billedet viser kornstrukturen, ved x100 forstørrelse [Vogel et al., 2009].*



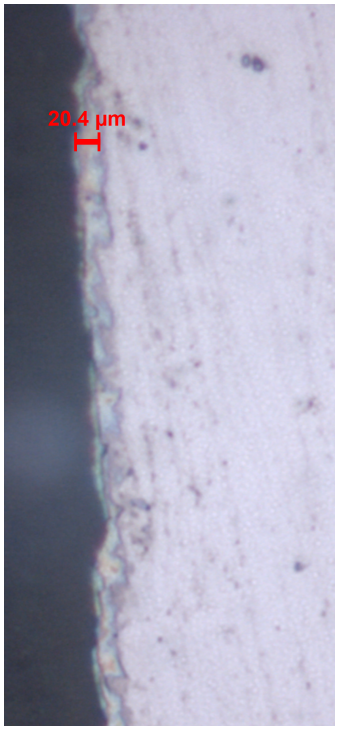
Figur 8.7: *Austenit. Billedet viser kornstrukturen, ved x100 forstørrelse [Vogel et al., 2009].*



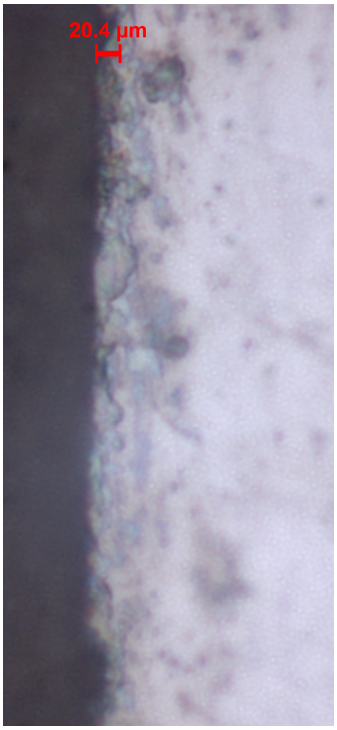
Figur 8.8: *Billede af det varmepåvirkede område i aluminium.*

Det forventes at kunne se enten et varmepåvirket område, som der ses ved skæringen af aluminium, eller en forskel i kornstrukturen, som vist for ferrit og austenit. På figur 8.9 ses den laserskårne kant, hvor der kan ses en ændring af kornstrukturen 20 μm ind i emnet. Sammenlignes ændringen af kornstrukturen, med ferrit og austenit, kan det være svært at bedømme hvad der ses. Det må dog antages at området op mod kanten, må være austenit, da det må være her emnet har opnået de højeste temperaturer. For at kunne sammenligne Grundfos' laserskæring og stansning, er samme billede for stansning undersøgt, og kan ses på figur 8.10. For det stansede emne ses ligeledes en ændring i kornstrukturen, i et område af 20 μm fra den stansede kant. Det påvirkede område må formodes at være austenit, da emnet vil blive påvirket af et tryk under udstansningen, og derved kan omdannelsen fra ferrit til austenit forekomme ved lavere temperaturer [Vogel et al., 2009]. Dannelsen af austenit ved stansning skyldes deformationshærdning.

Det kan formodes at valget af procesparametre for laserskæring kan have en indvirkning på de magnetiske egenskaber, da den varmepåvirkede zone være dybere ved lav hastighed og høj effekt [Moses og Loisos, 2005].



Figur 8.9: *Laserskåret emne, hvor der ses et varmepåvirket zone med en x100 forstørrelse.*



Figur 8.10: *Stanset emne, hvor der ses et mekanisk påvirket zone med en x100 forstørrelse.*

Valget af stål har også en indvirkning på påvirkningen af de magnetiske egenskaber ved brug af laserskæring, da mængden af kulstof vil øge stålets evne, til at fastholde austenit under afkøling[Belhadj et al., 2001].

9 Diskussion og delkonklusion

9.1 Procesparametre

For at være i stand til at ændre på laserskæringsprocessen, var det nødvendig at vælge en række procesparametre. Disse blev valgt ud fra hvilke der ud fra teori og tidligere publiceret forskning havde størst indvirkning på processen og kvalitetsparametrene. De valgte procesparametre var i stand til at ændre på processen, og specielt effekten, skærehastigheden, og gastrykket var af stor betydning. Det blev valgt at anvende dysediameteren, uden videre begrundelse end at den skulle have en påvirkning på kvaliteten af skæringen. Det må antages at dysediameteren har den samme effekt som gastrykket, da begge parametre har indflydelse på gastrykket i skæringen. Hvis yderlige forsøg skulle gennemføres, ville der med fordel kunne vælges gastryk, skærehastighed, og effekt, da disse er blevet fundet af størst betydning. Ved at minimere antallet af procesparametre, vil det være muligt at lave et fuldfaktor forsøg, eller diskretisere procesparametrene i flere niveauer. Under udførsel af forsøgene er det blevet observeret, at der var stor forskel på hvor nemt det var at ændre de enkelte procesparametre. Parametre som skærehastighed og effekt var hurtige at indstille, sammenlignet med dysediameteren. Disse var blot værdier som skulle ændres i g-koden for forsøgene. Modsat skulle der udføres forsøg som beskrevet i kapitel C.3.3, i forbindelse med udskiftning af dysen. Det kan derfor konkluderes at valget af procesparametre, har haft stor betydning for forsøgenes udfald.

9.2 Måleparametre og målemetoder

For at kunne kvantificere skærekvaliteten er en række kvalitetsparametre valgt. De udvalgte kvalitetsparametre er blevet valgt med inspiration fra standarden [DS/EN ISO 9013, 2002], da det var ønsket at anvende kvalitetsparametre, der kunne afspejle mål anvendt i industrien. Hjørnetolerancerne, skæg og vinkelrethedstolerancen er gode til at præsentere en kvalitet af det færdige emne, da disse vil have indflydelse på de geometriske tolerancer, f.eks. vil en høj mængde skæg, kræve efterbearbejdning. Til trods for at kvalitetsparametrene skal afspejle standarden er de samme målemetoder ikke benyttet. Skærebreddemålene vil ikke give meget information om kvaliteten af det færdige emne, men derimod noget om hvordan skæringen har været, da en bred skæring vil indikere en stor mængde leveret effekt i pladen. Anvende skærebredden som en kvalitetsparameter har vist sig at være unødvendig i projektets sammenhæng. Skærebredden blev valgt under den formodning at den kunne blive stor nok til at komplicere udskæringen af statorlamellens geometri. Dette var dog ikke tilfældet. Den varmepåvirkede zone (HAZ) er udeladt, selv om denne parameter kunne give information om de magnetiske egenskaber for det færdige emne. HAZ blev udeladt, da indledende målinger ikke viste nogle tegn på HAZ, det er dog senere fundet på de undersøgte Grundfos emner, og det må derfor formodes at det også vil forekomme ved de udførte forsøg. Disse konklusioner indikerer, at en indledende analyse af et eller flere indledende forsøg er nødvendig for at sikre at de rette informationer opnås under hovedforsøgene. Der blev udviklet CV programmer for at

standardisere målingen af kvalitetsparametrene. Anvendelsen af CV var meget tidkrævende da disse programmer skulle udvikles, og derpå verificeres. Under verificeringen af måleprogrammerne blev det klart, at det var vigtig at være stringent ved udførslen af opmålingerne, da små ændringer i konstanter for målemetoderne, kunne have stor indflydelse på måleresultaterne. Fordelen ved at anvende CV er dog blevet vurderet til, at være større end risikoen for at producere skævvridning af måleresultaterne, da risikoen for menneskelige fejl er blevet stærkt reduceret. De anvendte målemetoder, afviger en del fra standarden, og det er derfor svært at sammenligne, den opbyggede database, med andres arbejde.

9.3 Eksperimentelle forsøg

Inden de eksperimentelle forsøg kunne designes, skulle lasercellen sættes op. For den lasercelle stillet til rådighed, var der ikke blevet skåret i plader på 0,5 mm, og det blev derfor undersøgt at for gastryk over 10 bar, var der en deformation af pladerne. Det var derfor nødvendig at designe og fremstille et nyt fikstur. Det var ønsket at verificere resultaterne fra projektet, ved at skære en Grundfos statorlamel i lasercellen. Ved Grundfos anvendes der en TRUMPF laser, og der blev derfor brugt tid på at forsøge at tilslutte TRUMPF laseren uden held, da der opstod en lang række fejl med kølingen. For at være i stand til at kunne skære Grundfos statorlamellen, skulle XY-bordets mekaniske egenskaber, være i stand til at køre inden for de geometriske tolerancer, der er stillet til emnet. Motorstyringen for XY-bordet var ikke blevet indstillet til dette, da der ikke har været behov for at køre med andet end konstante hastigheder. Der blev derfor brugt tid på, at undersøge hvordan der kunne instilles en PID-controller. Det viste sig at PLC'en for motorstyringen, kun var sat op til at til at regulere med en forstærkning. For at være i stand til at anvende en anden styring, skal softwaren ændres. Dette blev vurderet at være uden for projekts formål.
Under designet af de eksperimentelle forsøg, blev det klart at det var nødvendig at anvende et reduceret faktorforsøg, da det vil blive for omfattende at udføre og analysere et fuldfaktorforsøg, med det antal af valgte procesparametre. Gennem forsøgsdesignprocessen blev tiden, der var nødvendig til at klargøre skæringerne til målinger undervurderet, da denne blev vurderet minimal. Det blev dog klart at støbning, slibning og polering, var den største tidfaktor gennem fremstilling af kvalitetsparametrene. Hvis tidsfaktoren til at klargøre skæringerne til måling, var kendt ville antallet af procesparametre eller diskretiseringen af disse blevet minimeret, og derved kunne alle forsøg være blevet udført.

9.4 Statistisk analyse af data

Da Databasen var opbygget, blev der fortaget en statistisk analyse. For at undersøge hvilke procesparametre der havde en påvirkning på hvilke kvalitetsparametre, benyttedes en variansanalyse, og derved blev der også taget højde for signalstøjen. Fra variansanalysen kunne det ses, at ingen af procesparametrene havde en indvirkning på vinkelretheden for det undersøgte parameterrum. Hvis vinkelretheden har stor betydning for det skårne emne, kunne parameterrummet udvides. Det kunne være at et gastyk lavere end 2 bar har en indvirkning, eller at en alternativ procesparameter som afstanden mellem emnet og gasdysen har en indvirkning. Det er usikkert hvorvidt hovedeffekter og vekselvirkninger for det reducerede faktor forsøg er valide, da laserskæringsprocessen er ulineær. Hovedeffekterne og vekselvirkningerne for fuld faktor forsøgene gav et billede af hvordan procesparametrene skulle indstilles for at påvirke kvalitetsparametrene, og det er derfor muligt at komme med et kvalificeret sæt procesparametre. Dette er dog ikke gjort, grundet opbygningen af en empirisk model i afsnit 11. Det kunne ses at mængden af vekselvirkning var lav for det anvendte parameterrum. Dette er fordelagtigt, da det derfor er nemmere at se hvordan pro-

cesparametrene og kvalitetsparametrene hænger sammen. Da der er blevet fravalgt en række skæringer, da disse har været svejsninger, kunne det tænkes at disse ville have haft en påvirkning af de statistiske analyser, da der er blevet anvendt få forsøg med høj skærehastighed. For at undersøge påvirkningen af de fravalgte forsøg, kunne der udføres en statistisk analyse af de forsøg, med lav hastighed, hvor det vides at alle forsøg er skåret igennem.

9.5 Analyse af Grundfos' statorlamel

Det blev undersøgt om der var en forskel mellem de stansede og laserskårne statorlameller fra Grundfos. Ved undersøgelse af de geometriske tolerancer for de to forskellige lameller, blev det klart at laserskæring genneralt er bedre for samtlige benyttede kvalitetsparametre. Yderligere varierer kvaliteten på en laserskåret lamel mindre end på den stansede. Det er ikke nødvendigvis ønskværdigt at have en forskel mellem den stansede og laserskårne lamel, da kvaliteten fra stator til stator bør være ensformig. Ved undersøgelse af hårdheden var der ikke nogen indikation på dannelse af austenit i de undersøgte punkter. Ved målingen af hårdheden, kunne der anvendes en mindre vægt, og derved ville det være muligt at komme tættere på skæringen. Konklusionen af undersøgelsen af de magnetiske egenskaber var, at der ikke blev fundet nogle forskelle på de to emner. Dette var dog inden for de målte områder. De to emner blev sammenlignet på de samme punkter, og det kan derfor ikke afkræftes at der kunne være andre forskelle, hvis der f.eks. blev sammenlignet ved en skæring og stansning af en radius frem for en ret linje. Hvis det skulle undersøges yderligere, om der er en forskel i de magnetiske egenskaber, bør det sikres at den laserskårne og stansede lamel er fra den samme rulle elektrostål, for derved at være sikker på at materialeparametrene er konstante.

Optimering og opbygning af procesmodel

II

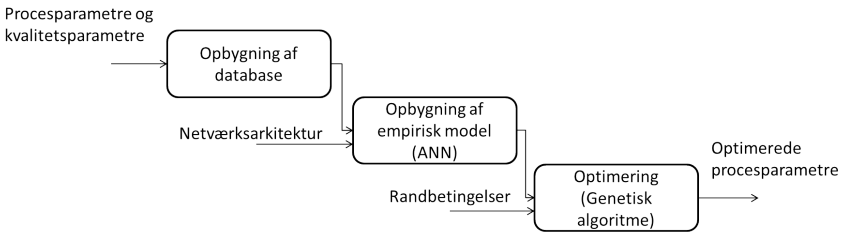
Valg af procesmodel og optimeringsmetode

10

Der skal udvikles et system, der kan relatere procesparametrene til en ønsket kvalitet, således det vil være muligt at forudsige skærekvaliteten som resultat af et givent sæt procesparametre. Dette skal gøres på baggrund af laserskæringsdatabasen, således resultatet vil være en empirisk procesmodel, der repræsenterer sammenhænge mellem procesparametre og skærekvalitet. Dette vil være en anden måde at repræsentere de statistisk fundne sammenhænge, hovedeffekter og vekselvirkninger som er præsenteret i kapitel 7. Den empiriske model skal være i stand til, ud fra et sæt procesparameterværdier, at finde samtlige kvalitetsparameterværdier. Modellen skal yderligere kunne benytte databasen til, at kunne forudsige et sæt kvalitetsparameterværdier, ud fra et sæt procesparameterværdier som ikke er repræsenteret af databasen, dog skal disse være indenfor det undersøgte parameterrum.

En optimeringsalgoritme skal efterfølgende, kunne optimere skærehastigheden ved brug af den empiriske procesmodel. Således det vil være muligt at sikre, at kvalitetsparametrene fra optimeringen er lignende eller bedre end Grundfos' stansekvalitet. Systemet skal som vist på figur 10.1, kunne optimere skærehastigheden for et sæt ønskede kvalitetsparametre. Der ønskes kvalitetsparametre tilsvarende Grundfos' stansekvalitet vist i tabel 8.1. Formålet er således at optimere skærehastigheden, for at kunne skære ved en hastighed på mere end 1400 mm/min, og samtidig opnå kvalitetsparametre tilsvarende eller bedre end Grundfos' stansekvalitet. Grundfos' nuværende laserskæringshastighed er på 1400 mm/min.

I dette kapitel undersøges mulige metoder til at opbygge en empirisk procesmodel til at relatere procesparametre og kvalitetsparametre. Yderligere undersøges hvilken optimeringsalgoritme, der kan anvendes til at optimere parametre for en yderst ulineær proces som laserskæring.



Figur 10.1: *Fremgangsmåde for optimeringen.*

Tidliger forsøg med laserskæring er undersøgt. En tendens har hidtil været at forsøge at begrænse antallet af proces- og kvalitetsparametre, for at øge gennemskueligheden for sammenhængen mellem disse parametre. Antallet af parametre for hhv. processen og kvaliteten, har typisk varieret mellem 1-4 og 2-6 parametre, for de benyttede kilder til tabel 5.3. Resultaterne har ikke nødvendigvis været ensoverstemmende, hvilket kan skyldes eksperimentering med forskellige parametre, hvor de konstante parametre, såsom materiale og bølgelængde varierer afhængigt af publikation. Mange metoder er blevet benyttet som en hybridløsning, til at blotlægge sammenhænge og efterfølgende optimere parametrene. Laserskæring er en yderst kompleks og ulineær proces, hvorfor en analytisk model vil være yderst tidskrævende og kompli-

ceret at opstille. Alternativet er empiriske datamodeller, som kan opdeles i tre grupper, der hidtil er blevet anvendt på metalskæringsprocesser med tilsvarende formål [Ray og Mukherjee, 2006]. Disse tre grupper indbefatter empirisk modellering af parameterrelationer, konventionelle og ukonventionelle optimerings teknikker.

10.1 Parameterrelation

En række metoder kan anvendes til at relatere procesparametre med et respons, som i dette tilfælde er kvalitetsparametrene. Ifølge [Ray og Mukherjee, 2006] har følgende metoder være benyttet til empirisk at modllere skæreprocesser: statistisk regression, kunstigt neuralt netværk (ANN) og fuzzy sæt. I dette tilfælde ønskes skæredatabasen benyttet, til at finde kvalitetsparametrene ud fra et givent sæt procesparametre, således skærehastigheden kan optimeres, og kvalitetsparametrene kan findes og sammenlignes med Grundfos' stansekvalitet under optimering.

Ved regression fittes et polynomie, f.eks. et 1. eller 2. ordens polynomium, til et givent datasæt. Denne metode giver resultater på niveau med ANN, og giver som ANN en sammenhæng mellem parametrene som ikke er nem at fortolke, specielt i ulineære tilfælde.

Fuzzy sæt benyttes typisk, når subjektiv viden eller meninger spiller en rolle ved valg af variable. Dette kunne typisk være erfaringsbaserede variable fra en procesekspert, eller blot ved diskrete ikke kvantifiserede variable. Metoden omfavner idéen om at ting ikke nødvendigvis er tilfældige, men blot er svagt definerede eller at der er utilstrækkelig viden til rådighed. Svagheden er, at den er regelbaseret og kan være det på baggrund af subjektivt opstillede regler [Ray og Mukherjee, 2006].

ANN er en metode der kan relatere adskillige in- og output parametre om de er lineære eller ej. Metoden kræver dog store mængder data for at undgå overtræning, hvor visse tillæges parametre for stor betydning. Udover dette er ANN som fuzzy sæt uafhængig af om dataene følger en bestemt fordeling. Metoden anbefales dog kun benyttet i tilfælde hvor regression ikke slår til [Ray og Mukherjee, 2006]. I forbindelse med forudsigelse af lasersvejsekvalitet, har ANN vist bedre resultater end regressionsanalyse [Acherjee et al., 2011]. Eftersom adskillige eksempler forefindes på benyttelse af ANN til modellering af laserskæringsprocessen, benyttes denne metode til at opbygge den empiriske procesmodel. Eksemplerne er beskrevet i kapitel 11.

10.2 Ukonventionel optimering

Ved konventionel optimering forsøges at finde en lokal optimal løsning, mens der ved ukonventionel optimering søges en global løsning, som tilnærmer sig en global nær-optimal løsning. Da laserskæring er yderst ulineær kan der være adskillige lokale optimale løsninger. Det er af interesse at finde den højest mulige skærehastighed, hvor kvalitetsparametrene er lig stansekvaliteten, men ikke nødvendigvis bedre. Derfor ses der bort fra konventionelle optimeringsteknikker, som f.eks. en gradientbaseret optimeringsalgoritme respons overflade metodologi (RSM).

Genetisk algoritme er en ukonventionel metode, som bygger på genmanipulation fra biologien. Denne metode er effektiv til at undersøge store søgeområder, og benytter en probabilistisk søgeretning. En algoritme med probabilistisk søgeretning vil med større sandsynlighed, end en gradient baseret, konvergere mod et

globalt minimum, hvis modellen er ulineær og ikke konveks. Istedet for blot at søge efter en løsning, søges der efter mange hvoriblandt den bedste findes. Metoden kan benyttes til både diskrete og kontinuerte objektfunktioner, samt til ulineær optimering. Problemet er dog at konvergens ikke er garanteret, algoritmen er langsom og resultater ikke nødvendigvis kan reproduceres [Ray og Mukherjee, 2006, Arora, 2004].

Af andre eksempler på ukonventionelle optimeringsmetoder er tabusøgning og simuleret udglødning givet i [Ray og Mukherjee, 2006]. Den genetiske algoritme vil dog blive benyttet, da denne tidligere er benyttet til lignende kvalitetsoptimering for laserskæring [Tsai et al., 2008].

10.3 Hybridoptimering

Den anvendte metode til at optimere skærehastigheden vil være en hybridmetode. Denne metode vil anvende et neuralt netværk til at relatere procesparametre med kvalitetsparametre, således en genetisk algoritme, kan optimere skærehastigheden ud fra samtlige procesparametre, og undersøge hvorvidt stansekvaliteten overholdes, ved brug af det neurale netværk.

Hybridmetoden er benyttet af [Tsai et al., 2008] til at optimere kvalitetsparametrene ud fra procesparametrene, fremfor som i dette projekt at optimere en procesparameter og istedet overholde et øsnket sæt kvalitetsparametre. De optimerede kvalitetsparametre er i hybridmetoden: skæredybde, skærebredde og udbredelsen af HAZ. De benyttede procesparametre er effekten, pulsfrekvensen og skærehastigheden . Yderligere har metoden været anvendt til at optimere virkningsgraden af en kemisk reaktor ved brug fire procesparametre og fire parametre for virkningsgraden [Amin og Istadi, 2012]. I [Zhang et al., 2008] har metoden været benyttet til den termiske skæreproces, gnistbearbejdning, hvor mængden af fjernet materiale pr. tidsenhed er optimeret ud fra strømstyrken, gnistpausen og gnisttiden.

Den empiriske model laves ved at træne et neuralt netværk, til at forudsige kvalitetsparametrene ud fra procesparametrene. Skærehastigheden optimeres efterfølgende ved at benytte en genetisk algoritme, som stokastisk optimerer skærehastigheden ved at ændre på alle 7 procesparametre, evaluere disse med et neuralt netværk, og undersøge hvorvidt kvalitetsparametrene er tilsvarende eller bedre end Grundfos' stansekvalitet.

Empirisk procesmodel

11

Til at relatere kvalitetsparamtrene med procesparametrene benyttes et neuralt netværk. Således benyttes en empirisk model baseret på laserskæringsdatabasen. Modellen kan bestemme skærekvaliteten, ud fra et hvilket som helst sæt procesparametre, afhængigt af modellens nøjagtighed. Modellens nøjagtighed afhænger af netværkets arkitektur og dataene benyttet til at træne netværket. I kapitlet gennemgåes først teori om neurale netværks grundlæggende virkemåde, der er relevant for det netværk som senere præsenteres. Efterfølgende undersøges lignende anvendelser af neurale netværk som ligger til grund for valg vedrørende netværksarkitekturen. Yderligere beskrives træningen af netværket samt valgene mhp. virkningsgraden. Slutteligt gennemgåes netværkets evne til at repræsentere laserskæringsdatabasen.

11.1 Neuralt netværk

Et neuralt netværk er en maskinlærings algoritme inspireret af hjernens virkemåde, udviklet til at relatere en række inputs med en række outputs. Virkemåden er simpel, hvorimod resultatet og opførslen ikke nødvendigvis er gennemskuelig. Neurale netværk er en af de hyppigst benyttede maskinlæringsalgoritmer, og anses til mange anvendelsesmuligheder for at være blandt de mest effektive algoritmer [Mitchell, 1997]. Metoden er effektiv til at modellere komplekse sammenhænge mellem mange in- og outputparametre, men giver en sammenhæng mellem parametrene som ikke kan fortolkes. Neurale netværk er desuden robuste mod at blive trænet på datasæt indeholdende fejl, og har en lang træningstid, men kort evalueringstid [Mitchell, 1997]. Den korte evalueringstid er fordelagtig, hvis modellen skal benyttes i samspil med en optimeringsalgoritme.

Neurale netværk opbygges af tre forskellige slags lag, et inputlag, et antal skjulte lag der kan tilpasses og et outputlag. Hvert lag består af et antal neuroner, disse neuroner er forbundet til alle neuroner i det forrige og det næste lag. Hver neuron vægter dets input fra forrige neuroner, summerer inputtene og giver et output til alle bagvedliggende neuroner afhængigt af en overføringsfunktion.
Den hyppigst anvendte type af neurale netværk er fremadkoblet. Denne type netværk tillader kun værdier at passere fremad i netværket fra inputlaget til outputlaget. Før et netværk kan forudsige sammenhænge mellem in- og outputs skal det trænes ud fra et datasæt. I dette tilfælde benyttes laserskæringsdatabasen til træningen af netværket. Ved træning indstilles vægte og bias for hver neuron, dette gøres typisk ved brug af backpropagation. Ved backpropagation sendes træningssættet igennem netværket, hvor vægtene tilpasses ved at sende den gennemsnitlige kvadrerede fejl (MSE) tilbage igennem netværket, for at udregne MSE ved hver neuron og justere vægtene [Mitchell, 1997]. Afvigelsen mellem netværks output og kvalitetsparametre fra databasen, benyttes til at udregne MSE. Denne afvigelse benyttes til at opdatere vægte og bias, hvorefter træningsættet sendes fremad i netværket. Dette fortsætter indtil et konvergenskrav er opnået. Den gennemsnitlige kvadrerede fejl mellem netværkets outputs og kvalitetsparametrene fra databasen, minimeres ved brug af en optimeringsalgoritme, og kan bl.a. benyttes som konvergenskrav.

Forfatter	Arkitektur	Overførings-funktion	Optimerings-algoritme	Forudsigelses-fejl	Trænings- og testsæt
[Tsai et al., 2008]	3-3-6	Log-Sigmoid	LM	1,512 %	27-14
[Kuo et al., 2011]	5-4-3	Log-Sigmoid	LM	$\leq 5\%$	13-5
[Acherjee et al., 2011]	4-4-5-2	Log-Sigmoid	LM	4.82 %	20-6
Projekt	7-30-6	Log-Sigmoid	LM	44.1 %	89-26

Tabel 11.1: *Neurale netværksarkitekturer brug til laserskæring og lasersvejsning.*

11.2 Lignende anvendelser

Neurale netværks anvendelsesmuligheder har vist sig at være enorme, og har været benyttet til klassificering af tekst og signaler, tale- og håndskriftsgenkendelse, ansigtsgenkendelse, og procesoptimering af kvalitet for adskillige typer af processer [Mitchell, 1997]. Neurale netværk er yderligere blevet anvendt til at opstille empiriske modeller til kvalitetsevaluering inden for lasersvejsning og laserskæring. Til dette formål har [Acherjee et al., 2011] relateret 2 kvalitetsparametre for lasersvejsning med 4 procesparametre. Dette er gjort ved brug af et fremadkoblet neuralt netværk med backpropagation. Netværket består af 2 skjulte lag med henholdsvis 4 og 5 neuroner, hver med Log-Sigmoid overføringsfunktionen. Inputsne er normaliserede mellem 0 og 1 og konvergensparametre er indstillet ved at prøve sig frem, og vælge de parametre med mindst mulig MSE. Netværket er trænet på 20 sæt, testet på 6 og giver en gennemsnitlig forudsigelsefejl på 4.82%.
Til laserskæring er et fremadkoblet backpropagation neuralt netværk med Levenberg-Marquardt(LM) optimeringsalgoritme benyttet til parameterrelatering af [Kuo et al., 2011]. Her benyttedes en log-sigmoid overføringsfunktion og normalisering af in- og outputs til intervallet mellem 0 og 1. Antallet af neuroner i de skjulte lag N_s anbefales fundet ud fra antallet af neuroner i inputlaget N_i og outputlaget N_o:

$$N_s = \frac{N_i + N_o}{2} \tag{11.1}$$

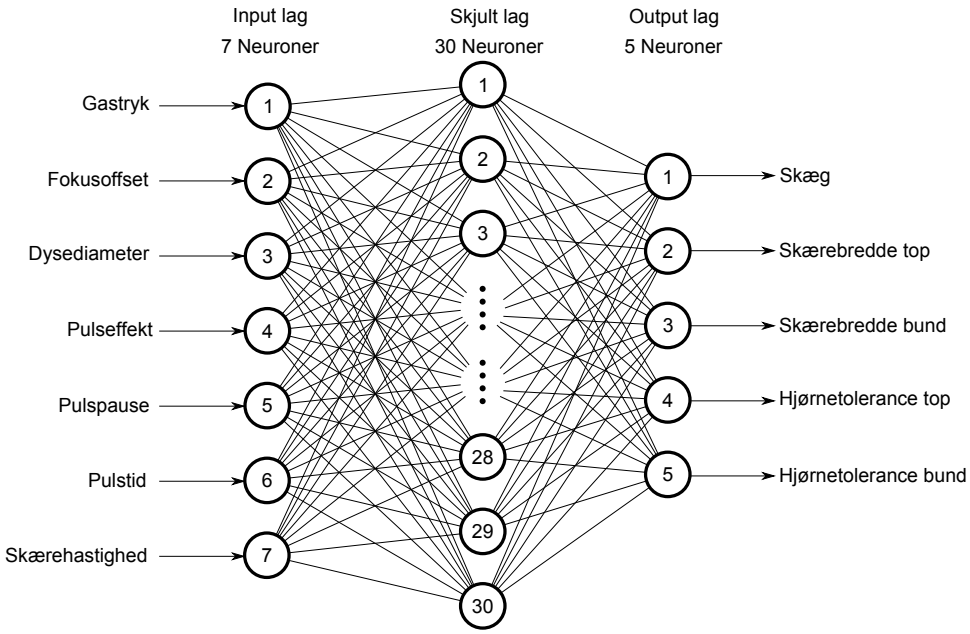
$$N_s = \sqrt{N_i + N_o} \tag{11.2}$$

Der blev benyttet 3 lag, et inputlag med 5 neuroner, et outputlag med 3 neuroner og et skjult lag med 4 neuroner. Netværket blev trænet på 13 datasæt og testet på 5, med en forudsigelsesfejl på maksimalt 5%.
I [Tsai et al., 2008] benyttes et inputlag med 3 neuroner, et skjult lag med log-sigmoid overføringsfunktion for 3 neuroner, og et outputlag med en lineær overføringsfunktion og 6 outputs, til parameterrelatering ved laserskæring. Netværket er trænet på 27 sæt og testet på 14 sæt, med en gennemsnitlig forudsigelsefejlrate på 1.512%. Gradient Descent, Quasi-Newton, Scaled Conjugate Gradient og Levenberg Marquardt søgealgoritmer blev alle benyttet, hvoraf Levenberg-Marquardt resulterede i den mindste gennemsnitlige kvadrerede fejl.

11.3 Netværksarkitektur

Netværksarkitekturen har indflydelse på netværkets evne til at forudsige kvalitetsparametre ud fra procesparametre, og valg vedrørende arkitekturen er beskrevet i det følgende. Arkitekturen vil have indflydelse

på evnen til at repræsentere hhv. data benyttet til træning fra databasen, og parameterværdier ikke repræsenteret i databasen. Det neurale netværk er trænet og benyttet i MATLAB. Netværksarkitekturen fremgår af figur 11.1, hvor der er benyttet tre lag, et input med 7 neuroner, et skjult lag med 30 neuroner og et outputlag med 5 neuroner. Det er undladt at benytte vinkelrethedstolerancen, eftersom ingen sammenhæng mellem denne kvalitetsparameter og procesparametrene har kunne påvises i kapitel 8, og derfor anses som værende støj.



Figur 11.1: *Netværksarkitektur.*

Det trænede netværk har som evaluering fået samtlige 115 skæringer som input. Fremover benævnes disse skæringer som træningseksempel angivet ved j. Outputtet af netværket er kvalitetsparametrene for hver af de 115 sæt af procesparameterindstillinger. Forudsigelsesfejlen e, som er den procentvise forskel mellem det trænede netværks output Y og værdierne for kvalitetsparametrene i databasen T, er udregnet for hver kvalitetsparameter i, for de 115 træningseksempler som i ligning 11.3.

$$e_{i,j} = \frac{|T_{i,j} - Y_{i,j}|}{T_{i,j}} \cdot 100\% \tag{11.3}$$

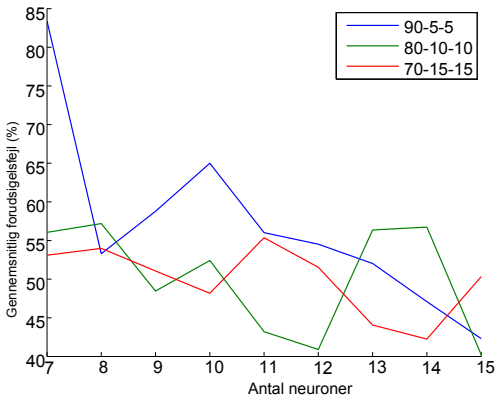
Gennemsnittet μ_i er efterfølgende fundet for hver kvalitetsparameter over de 115 træningseksempler j , hvorefter gennemsnittet μ_{fejl} af de 5 kvalitetsparametrene i, udregnes som i ligning 11.4.

$$\mu_{fejl} = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}\mu_i = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}\left(\frac{1}{115}\sum_{j=1}^{115}e_{i,j}\right) \tag{11.4}$$

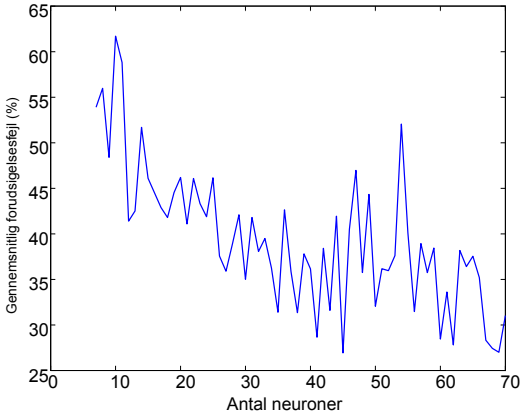
Denne gennemsnitlige forudsigelsesfejl μ_{fejl} blev benyttet til at sammenligne og udvælge netværksarkitekturen samt, opdelingen af databasen og hermed træningseksemplerne til trænings-, valideringss- og testsæt. I alle disse tilfælde er et gennemsnit fundet af μ_{fejl} over 10 gentagne træninger med samme netværksstruktur. Dette skyldes at opdelingen af de 115 træningseksempler, foretages tilfældigt, og denne opdeling kan have betydelig indflydelse på netværkets forudsigelsfejl. Benyttes alle træningseksempler

hvor skæringshastighederne er over 20000 mm/min til test, vil det trænede netværk forudsige med stor procentvis fejl ved disse hastigheder, da neurale netværk ikke er gode til at ekstrapolere [Mitchell, 1997]. Hvis alle træningseksempler ved høj skærehastighed befinder sig i testsættene, er netværket ikke trænet til at repræsentere disse, og vil være nødsaget til at ekstrapolere.

Træningseksemplerne er opdelt i tre sæt, et til træning, et til validering og et til test. Den opdeling af databasen der har givet den bedste gennemsnitlige forudsigelsesfejl, er 70% til træning og 15% til hhv. validering og test. Opdelingen af databasen er foretaget ud fra figur 11.2. Opdelingen 90-5-5 har den største varians og vidner dermed om stor risiko for overtræning, da træningssættet er for stort i forhold til testsættet, og dermed er meget afhængig af hvilke træningseksempler der ender i hvilket sæt. Opdelingen 70-15-15 giver den mindste varians samt de bedste forudsigelsesfejl.



Figur 11.2: *Gennemsnitlig forudsigelsesfejl for tre databaseopdelinger afhængigt af antal neuroner med træningssæt-testsæt-valideringssæt.*



Figur 11.3: *Gennemsnitlig forudsigelsesfejl ved varierende antal neuroner.*

Antallet af skjulte lag er holdt til et lag. Udgangspunktet bør være at starte med færrest mulige lag, og øge antallet af disse såfremt en mindre fejl ønskes [MATLAB, 2013]. Øges antallet af lag risikeres overtræning, således netværket ikke vil kunne generalisere og dermed forudsige outputtet for inputs der ikke er blevet trænet på.

For at vælge antallet af neuroner i netværket, er et netværk trænet med varierende antal neuroner fra 7 til 70. Hver træning af netværket, for et givent antal neuroner, er gentaget 10 gange, og et gennemsnit af forudsigelsesfejlen er fundet. Af figur 11.3 fremgår det, at jo flere neuroner, desto mindre forudsigelsesfejl. Ved stigende forudsigelsesfejl og antal neuroner, forekom overtræning i stigende grad. Omkring 40 neuroner og derover giver store udsving i forudsigelsesfejlen, hvilket vidner om overtræning. Dette fremgik ved, at standardafvigelsen af fejlene $(T - Y)$ blev betydeligt mindre, mens variansen steg betydeligt til 8776. Til sammenligning har den valgte arkitektur på 7-30-5, en varians på 3911 som vist på figur 11.4. Ved 30 neuroner er udsvinget i forudsigelsfejlen lavt, og udsvingene i forudsigelsesfejlen er betydeligt mindre end for mere end 40 neuroner.

Til outputlaget er benyttet lineære overføringsfunktioner. Til de skjulte lag er overføringsfunktionen log-sigmoid benyttet. Det er ønskværdigt at have funktioner såsom log-sigmoid, der kan udvise ulineære sammenhænge da laserskæring er en yderst ulineær proces. Et alternativ til ulineære funktioner er en tilnærmelse ved brug af lineære funktioner, og træningssættene vil kunne opdeles, om de er lineært opdelelige eller ej [Mitchell, 1997]. Brugen af lineære overføringsfunktioner i de skjulte lag, resulterede i

Egenskab	værdi
Maks. antal iterationer	100000
Maks antal valideringer	6
Mål (MSE)	0.001
Mindste gradient	$1 * 10^{-15}$
μ	0.001
$\mu_{formindskelse}$	0.1
$\mu_{forogelse}$	10
μ_{max}	1e10
Tid	∞

Tabel 11.2: *Indstillinger for optimeringen af det neurale netværk.*

en dårligere forudsigelsesfejl ved en given netværksarkitektur, end ved brug af log-sigmoid funktionen. Dette kan skyldes at flere skjulte lag er nødvendige, for at udvise ulineære sammenhænge og at brugen af flere skjulte lag kan resultere i overtræning.

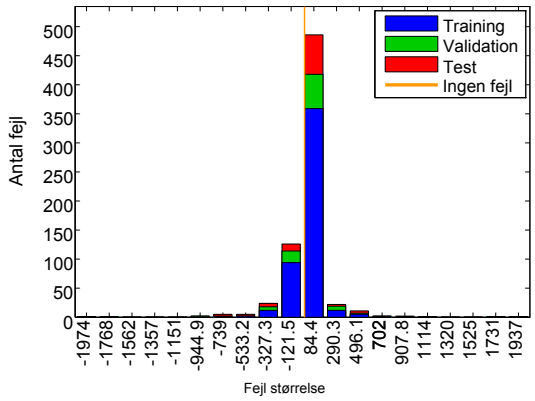
For at undgå lange træningstider samt numerisk dominans blandt datasæt, inputs og outputs, normaliseres træningssættene og testsættene til intervallet [-1;1] [Hsu, 2010][MATLAB, 2013]. Netværket er fremadkoblet og benytter backpropagation til optimering, eftersom dette er en af de hyppigst benyttede neurale netværkstyper, og tidligere har været succesfuldt benyttet til samme formål. Søgealgoritmen Levenberg Marquardt er benyttet, da den er blandt de hyppigst anvendte søgefunktioner og er en hybrid af Gauss-Newton og gradient steepest descent. Indstillingsparametrene for Levenberg-Marquart algoritmen er vist i tabel 11.2, hvor antallet af iterationer er højt, eftersom optimeringen konvergerede på relativt få iterationer. Konvergenskriteriet for størrelsen på gradienten blev indstillet så lavt, at optimeringen ikke konvergerede ved dette kriterie. Størrelsen af μ, som afgør hvorvidt Gauss-Newton eller gradient steepest descent benyttes, syntes ikke at have indflydelse på konvergensen. Optimeringen konvergerede efter få iterationer ved at MSE forværredes eller stagnerede for valideringssættet over 6 gentagne iterationer. Dette kunne skyldes at μ var indstillet for lavt og optimeringen således aldrig nåede et globalt minimum, under de givne betingelser, ved at øge μ lykkedes det ikke at opnå en bedre MSE.

11.4 Virkningsgrad

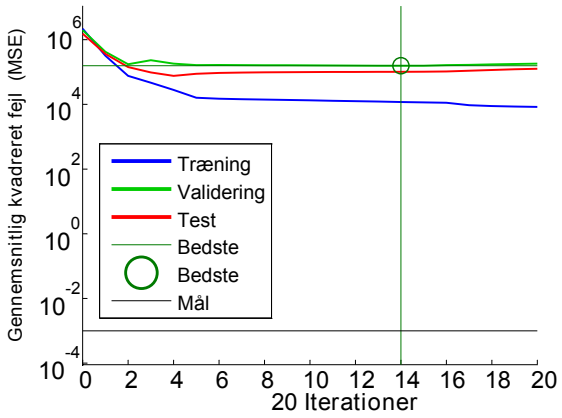
Efter netværksstrukturen er fastlagt, er netværket trænet med denne struktur indtil netværket udviste den bedst mulige opførsel. Den bedste opførsel er et valg mellem evnen til at generalisere og kunne forudsige træningsdataene med mindst mulig fejl. Det valgte netværk har en forudsigelsesfejl på 44.1% og udviser symptomer på manglende evne til at generalisere. Den manglende evne til at generalisere ses på figur 11.4, da det primært er valideringssættet og testsættet, der resulterer i store fejl. Standardafvigelsen er dog større og variansen mindre end ved et højere antal neuroner.

Optimeringen konvergerede i løbet af 14 iterationer, hvor træningssættet som forventet gav en mindre MSE end test- og valideringssættet, som vist på figur 11.5. Da test- og valideringssættet følger hinanden, er der ingen tegn på en dårlig opdeling af sættene. Yderligere er der ingen tegn på overtræning eftersom disse ikke stiger betydeligt og der ikke er store udsving.

På figur 11.6 ses et lineært fit af dataene repræsenteret ved netværket. Det optimale fit gennem dataene

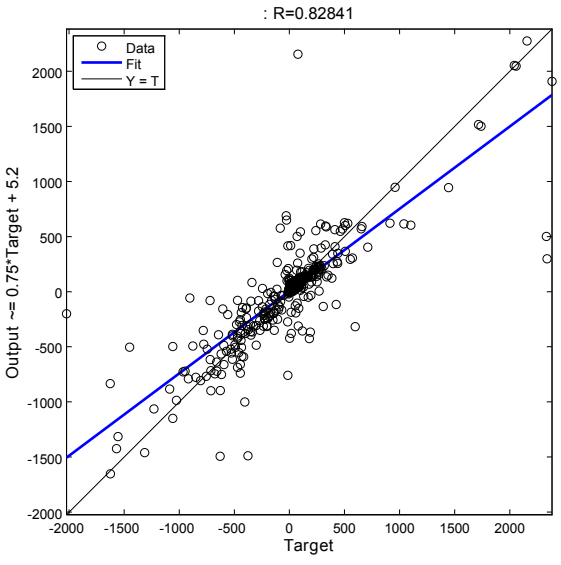


Figur 11.4: *Histogram over fejlfordelingen ved træning, validering og test.*



Figur 11.5: *Den gennemsnitlige kvadrerede fejl som funktion af iterationsnummer under optimering for træning, validering og test.*

ligger ved den tynde sorte streg og repræsenterer $R^2 = 1$. R^2 angiver modellens evne til at repræsentere dataene. Ved et perfekt fit, ville alle datapunkter ligge på denne linje. Dette er dog ikke tilfældet, og derfor er $R^2 = 0.83$. Punkterne langt fra linjen må repræsentere testsættet, da modellens evne til at repræsentere testsættet frem for træningssættet er ringere end. En højere R^2 værdi ville enten være på bekostning af de i forvejen dårligt fittede punkter, eller de punkter tæt ved $R^2 = 1$. Således havde dette været et valg mellem evnen til at generalisere eller repræsentere træningsdataene.



Figur 11.6: *Lineært reggresionsfit af netværkets output Y til databasens værdier for kvalitetsparametrene T.*

For at øge generaliseringsevnen kunne optimeringsalgoritmen Bayesiansk regularisering, som ikke kræver et valideringssæt, benyttes. Dermed kan en større datamængde benyttes til træning. På denne måde kunne hele databasen benyttes til at træne et neuralt netværk, som efterfølgende eftervises ved at lave stikprøver og fysisk eftervise disse stikprøver som laserskæringsforsøg. En anden løsning ville være at udvide med flere træningseksempler, specielt i de områder hvor datamængden er sparsommelig som ved f.eks. høje

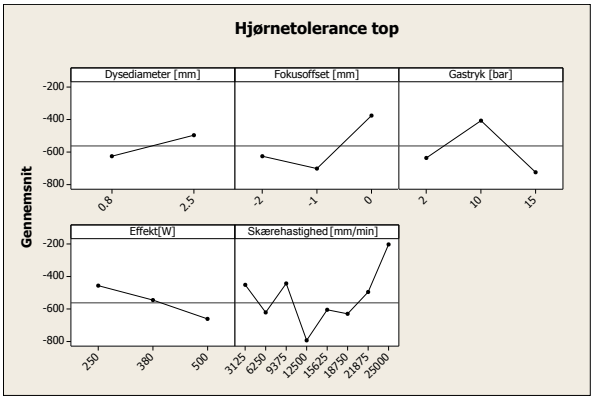
hastigheder og højt gastryk. Det burde gøres ved at sikre, at ved udførsel af det strukturerede forsøg, gennemskæres alle skæringer. Dette ville dog kræve en yderligere indskrænkning af parameterrummet.

11.5 Eftervisning

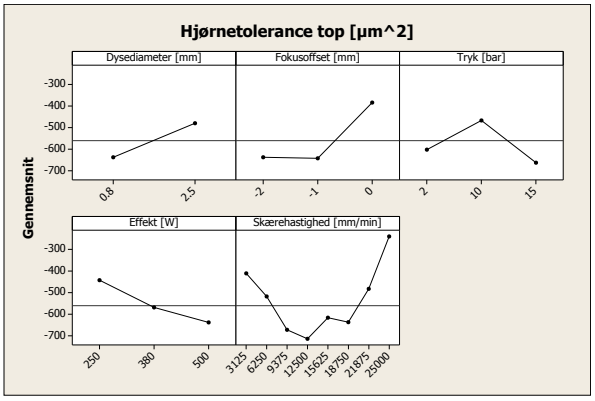
For at eftervise virkningsgraden af det neurale netværk, sammenlignes denne med de indsamlede data under laserskæringsforsøgene. Dataene er repræsenteret på figur 11.7 til 11.16, hvor gennemsnittet af kvalitetparametrene er vist for hver enkel procesparameterindstilling. Således ses på figur 11.7, gennemsnittet for hjørnetolerancen i toppen, for hver af de fem benyttede procesparametre under skæring med kontinuerlig stråle. Gennemsnittet er fundet af hjørnetolerancen for samtlige skæringer med en dysediameter på 2.5 og 0.8 mm, uafhængigt af indstillingen af de resterende parametre. I kapitel 7 forefindes tilsvarende grafer for de pulserede forsøg.

Det fremgår af samtlige nedenstående figurer, at sammenhængen mellem tendenserne for databasen og netværket er overensstemmende for samtlige parametre. F. eks. bliver skærebredden i toppen bredere, ved et fokusoffset på -1 og -2 mm. Udover dette passer de gennemsnitlige værdier overens, dette er dog ikke ensbetydende med at nøjagtigheden af det neurale netværk er god, eftersom forudsigelsesfejlen for netværket er på 44,1%. Denne høje forudsigelsesfejl skyldes primært de data som der er testet på, som netværket har sværere ved at repræsentere end de data som det er trænet på.

Tendensen for skærehastigheden er, at den afviger mellem databasen og netværket. Med kun 3 lag i det neurale netværk, kan netværket muligvis have problemer med at repræsentere de ulineariteter som datasættet indeholder, hvormed der ses en linearisering af hastigheden som der ses på figur 11.16 sammenholdt med figur 11.15.

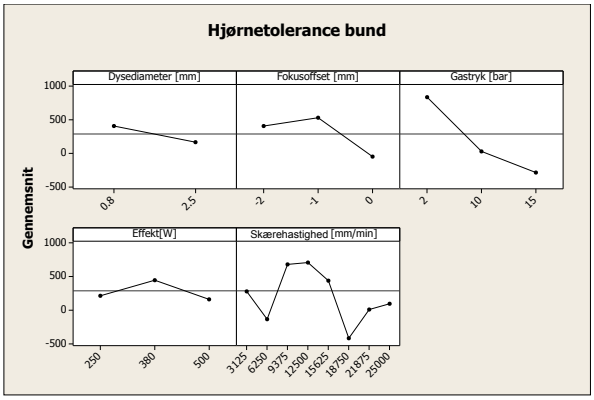


Figur 11.7: *Hovedeffekterne for hjørnetolerancen top for databasen.*

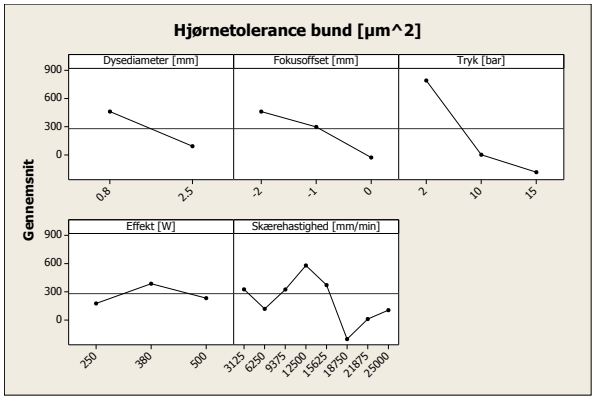


Figur 11.8: *Hovedeffekterne for hjørnetolerancen top for det neurale netværk.*

Både for skærebredden i toppen, på figur 11.11 og 11.12, og i bunden på figur 11.13 og 11.14, ses at en stigende effekt påvirker skærebredden negativt, da skærebredden bliver større. På figur 11.11 og 11.13 giver en effekt på 250 W omtrent samme skærebredde som ved 380 W. Dette kan skyldes manglende data ved lav effekt, da det er de skæringer med både lav effekt og lav hastighed som er gennemskåret. Således forskydes gennemsnittet mod en højere skærebredde, da en lav effekt og lav hastighed vil give en større skærebredde, end ved lav effekt og høj hastighed. Denne manglende datamængde skyldes at en fraktionel taguchi forsøgsmetode benyttedes, hvilket ikke burde give problemer med analysen af dataene



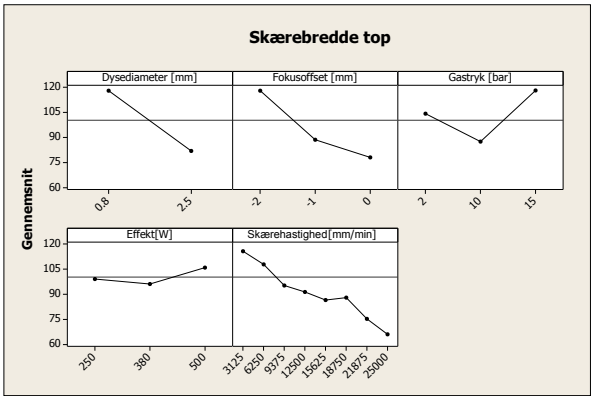
Figur 11.9: *Hovedeffekterne for hjørnetolerancen bund for databasen.*



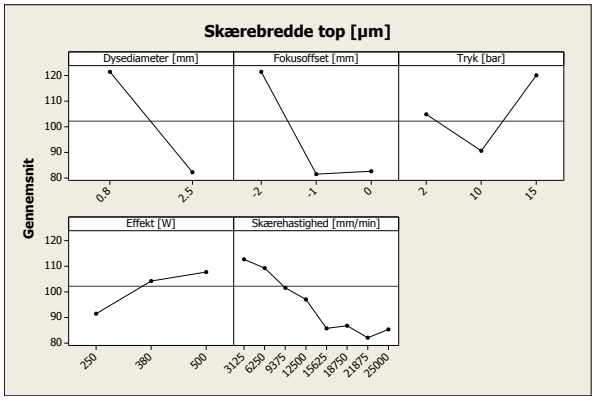
Figur 11.10: *Hovedeffekterne for hjørnetolerancen bund for det neurale netværk.*

[Montgomery, 2013]. Da ikke alle forsøgene i Taguchi-metoden blev udført, reduceredes datamængden yderligere, og da ikke alle skæringer er gennemskåret, giver dette yderligere en reduktion. Således er datasættet for kontinuerlig laserskæring mangelfuldt for visse procesparameterindstillinger, og analysen af disse figurer kan således være upålidelig 7.

På figur 11.12 og 11.14 er skærebredden lavere ved 250 W end ved 380 W, som var forventet ved sammenligning med tabel 5.3. Dette skyldes at det neurale netværk er trænet på hele databasen, indeholdende både forsøg med kontinuerlig og pulseret stråle. Således er netværket i stand til bedre at repræsentere sammenhængen mellem skærebredden og lave effekt og hastighed. Den samme information er ikke videreført for dysediameteren, gastrykket og fokusoffsettet fordi disse var konstante under pulsforsøgene.



Figur 11.11: *Hovedeffekterne for skærebredden top for databasen.*

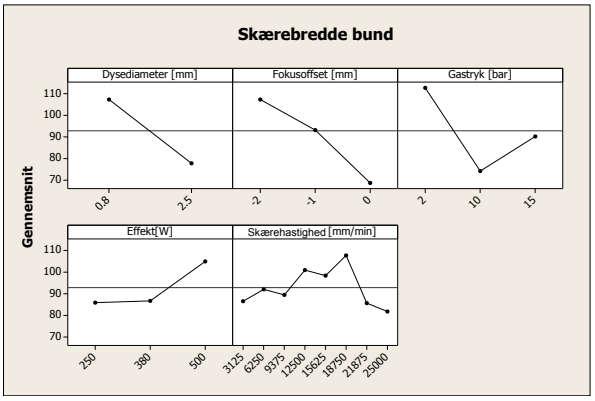


Figur 11.12: *Hovedeffekterne for skærebredden top for det neurale netværk.*

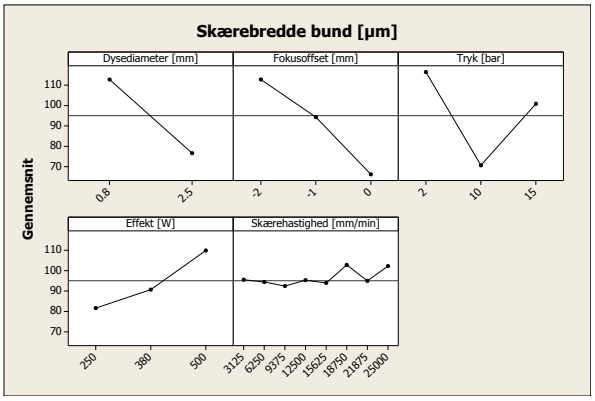
Ifølge tabel 5.3 burde et stigende gastryk give en bredere skærebredde. Ifølge figur 11.11 til 11.14 for skærebredden i toppen og bunden, har gastrykket et kritisk virkeområde ved omrking 10 bar, hvorefter skærebredden forværres i overenstemmelse med tabellen. Ved at øge fokusoffsettet til under pladen, forringedes både skærebredden i bunden og toppen. Dette er således et tegn på at skærebredden har et kritisk virkeområde, eftersom det i [Ghany og Newishy, 2005] viste sig at skærebredden mindskedes ved at sætte fokuspunktet hhv. 0.5 og 1.0 mm under overfladen på en 1.2 mm tyk plade. Dermed havde det sandsynligvis været mere fordelagtigt at placere fokuspunktet 0.25 og 0.5 mm under oversiden af pladen istedet for

1 og 2 mm. Kun skærebredden i toppen mindskes ved stigende hastighed, i overensstemmelse med tabel 5.3. Der er ikke umiddelbart nogen tydelig sammenhæng for skærebredden i bunden. Det samme gør sig gældende ved de pulserede forsøg vist på figur 7.1 og 7.5 i kapitel 7.

Det fremgår af både de pulserede og kontinuerlige skæringer, at en stigende effekt giver en større skærebredde, i overensstemmelse med tabellen. Dette skyldes at en støre mængde energi afsættes og udbredes i pladen. Det er ikke muligt at vurdere pulsfrekvensens indvirkning på skærebredden ud fra pulspausen på figur 7.4 og 7.5. Dette skyldes at ændringen ift. gennemsnittet er meget lille, og at pulspausen har en modsatrettet effekt på skærebredden i bunden og toppen.

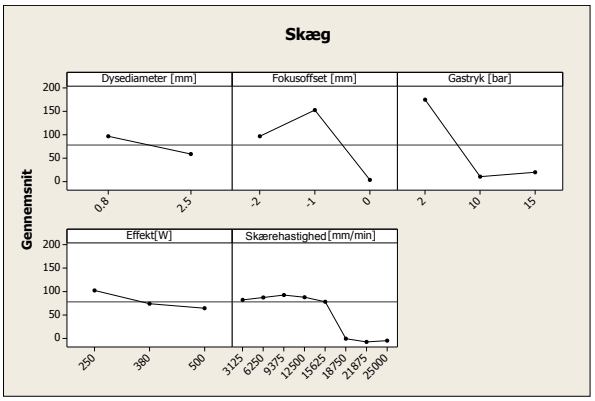


Figur 11.13: *Hovedeffekterne for skærebredden bund for databasen.*

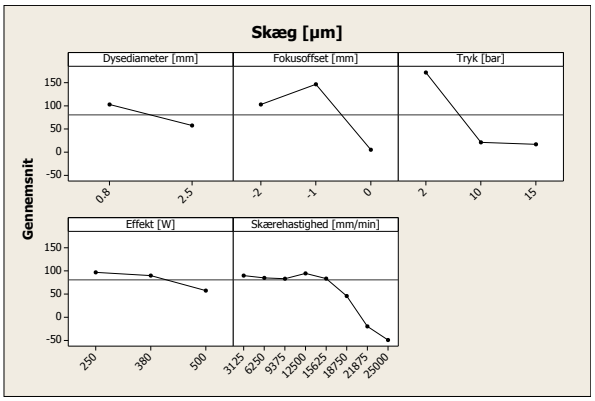


Figur 11.14: *Hovedeffekterne for skærebredden bund for det neurale netværk.*

Det fremgår af figur 11.15 at der primært dannes skæg ved lave hastigheder, lavt gastryk og et fokusoffset på -1 til -2 mm. Det er ikke umiddelbart muligt at se nogen sammenhæng mellem pulstiden og pulsfrekvensen, som vist i tabel 5.3.



Figur 11.15: *Hovedeffekterne for skæg for databasen.*



Figur 11.16: *Hovedeffekterne for skæg for det neurale netværk.*

For at overskueliggøre procesparametrenes indvirkning på kvalitetsparametrene fra figurerne for hovedeffekterne, samt figurerne fra kapitel 7, er disse vist i tabel 11.3. I tabellen er sammenhænge mellem parametre markeret med hhv. et '+','-' og en '*'. Et '+' angiver en forbedring af kvaliteten ved at øge værdien af procesparameteren og et '-' angiver en forrringelse. En '*' angiver at resultaterne ikke har vist en entydig sammenhæng, men at parameteren har et kritisk virkeområde. Blanke felter ' ' skyldes en

manglende eller blot en svag sammenhæng for, hvorvidt kvaliteten forringes eller forbedres.

Det fremgår af tabellen, at en høj hastighed og stor dysediameter udelukkende har en positiv indvirkning på kvalitetsparametrene. En forøgelse af effekten eller pulsvarigheden medfører, at mere materiale fjernes, og har dermed en negativ indflydelse på samtlige kvalitetsparametre pånær dannelsen af skæg. Et tryk ved omkring 10-15 bar, er ud fra figurerne for hovedeffekterne det mest optimale, inden for det anvendte parameterrum. Er trykket 15 bar resulterer dette i mindst muligt dannet skæg, samt at mindst mulig materiale størkner ved hjørnetolerancen i bunden. Modsat giver et tryk ved 10 bar, den bedste kvalitet for de resterende kvalitetsparametre, og et tryk på 15 bar forringer kvaliteten. At øge fokusoffsettet til -1 og -2 mm giver en forringelse af kvaliteten for samtlige parametre, hvilket skyldes at disse værdier er for høje. En indstilling af en procesparameter efter en bestemt kvalitetsparameter, kan forringe kvaliteten af de resterende, som det fremgår af effekten og trykket.

	Skærebredde top	Skærebredde bund	Hjørnetolerance top	Hjørnetolerance bund	Skæg
Effekt	-	-	-	*	+
Pulspause					
Pulsvarighed	-	-	-	-	
Tryk	*	*	*	+	+
Dysediameter	+	+	+	+	+
Hastighed	+		+		+
Fokusoffset	-	-	-	-	-

Tabel 11.3: *Analyserede laserskæringsrelationer for databasen.*

Optimering af skærehastighed 12

Den empiriske procesmodel benyttes til at evaluere et givent sæt procesparametre, for således at kunne vide hvordan de tilsvarende kvalitetsparametre. En genetisk optimeringsalgoritme vil søge procesparameterrummet for at kunne optimere skærehastigheden, og samtidig overholde en række krav til kvalitetsparametrene. Disse krav afhænger af Grundfos' nuværende laserskårne og stansede statorkvalitet som blev undersøgt i kapitel 8. Den genetiske algoritme vil således finde et sæt procesparametre, som evalueres af det neurale netværk, for at undersøge hvorvidt kvaliteten overholder de opstillede krav.

Formålet med optimeringen er, at finde den højest mulige skærehastighed, således kvalitetsparametrene vil være tilsvarende Grundfos' nuværende laserskærings og stansekvalitet. Der benyttes et gennemsnit af hhv. skære- og stansekvaliteten fra tabel 8.1 til at definere randbetingelserne for optimeringen. Der foretages seperate optimeringer, hvor der hhv. benyttes Grundfos' stanse- og laserskæringskvalitet som randbetingelser.

12.1 Genetisk algoritme

Genetisk algoritme er en optimeringsalgoritme, som tager udgangspunkt søger stokastisk efter et minimum, og procesmodellen behøver derfor ikke at være konveks, for at sikre at et globalt minimum findes. Idet laserskæring er en ulineær proces, og procesparametrenes vekselvirker, er det en fordel at den genetiske algoritme er stokastisk. Yderligere er dette en fordel da alle 7 procesparametre vil ændres stokastisk, og kun skærehastigheden vil have indflydelse på objektfunktionen.

Optimering ved brug af en genetisk algortime foregår ved, at en bestand bestående af kromosomer forbedres over et antal generationer. Kromosomerne består af gener, som blot er repræsentative værdier for designparametrene og altså procesparametrene. For hver generation reproduceres kromosomerne, for at sikre at de for hver generationsskifte bliver mere egnede. Kromosomernes egnethed evalueres ud fra objektfunktionen, som er den funktion der søges minimeret [Arora, 2004].

Reproduktionen af kromosomerne foregår ved, at generne overkrydses mellem kromosomerne eller at de muterer. Disse to reproduktionsmetoder gentages generation efter generation, indtil algoritmen konvergerer. Bestandelen angiver antallet af kromosomer. Jo flere kromosomer, jo større sandsynlighed for at opnå en optimal løsning, dog på bekostning af beregningsmæssig tid. Kromosomerne er bud på mulige løsninger og ændres fra generation til generation. Der er valgt 2 elite kromosomer, ensbetydende med at de 2 bedste kromosomer fra en generation, overgår til næste generation uden ændringer i generne. Dette antal er sat lavt, for at undgå tidlig konvergens mod et lokalt minimum [Arora, 2004].

Overkrydsningsfraktionen er den andel af bestanddelen som skal overkrydses. Ved overkrydsning udvælges en andel af kromosomernes gener som ombyttes, i et forsøg på at udnytte de gener med en høj

egnethed, til at producere nye kromosomer udfra. Istedet for som typiske optimeringsalgoritmer at benytte en gradient, til at søge efter en optimal løsning, findes løsningen med en genetisk algoritme probabilistisk. Dette sker ved at de kromosomer med høj egnethed, har en stor sandsynlighed for at blive udvalgt til overkrydsning, mens de kromosomer med en lav egnethed, har en lav sandsynlighed. Modsat overkrydsning som skal sikre konvergens, benyttes mutering til at muliggøre nye løsningsmuligheder. Ved mutering ombyttes tilfældige gener med tilfældige værdier, for den del af bestanddelen som ikke benyttes til overkrydsning. For hver generation vælges to elite kromosomer, som uden ændringer videreføres til næste generation [Arora, 2004].

12.2 Virkemåde

Hybridmetoden med optimering af inputparametre til et neuralt netværk, begrænset af outputparametrene som randbetingelser, fungerer som vist på figur 12.1. Fremgangsmåden tager udgangspunkt i den præsenteret i [Amin og Istadi, 2012]. Det neurale netværk er allerede trænet og evalueret i kapitel 11, som vist i det første trin på figuren. Efterfølgende initialiseres optimeringsalgoritmens oprindelige bestand i trin nr. 2. Løsningsvektoren indeholdende de bedste kromosomer fra bestanden gives som input til netværket, der evaluerer inputs og relaterer dem til et sæt kvalitetsparametre. Kvalitetsparametrene sammenholdes med en række randbetingelser fra tabel 12.3. Efterfølgende reproduceres bestanden i trin 4, og algoritmen opdateres i trin 5 til den efterfølgende generation. Efter det 5. trin undersøges alle konvergenskriterierne, og såfremt algoritmen konvergerer som følge af et af disse kriterier benyttes løsningsvektoren fra trin 3, og hvis ikke gentages trin 3 til 5 indtil algoritmen konvergerer som følge af et af konvergenskriterierne.

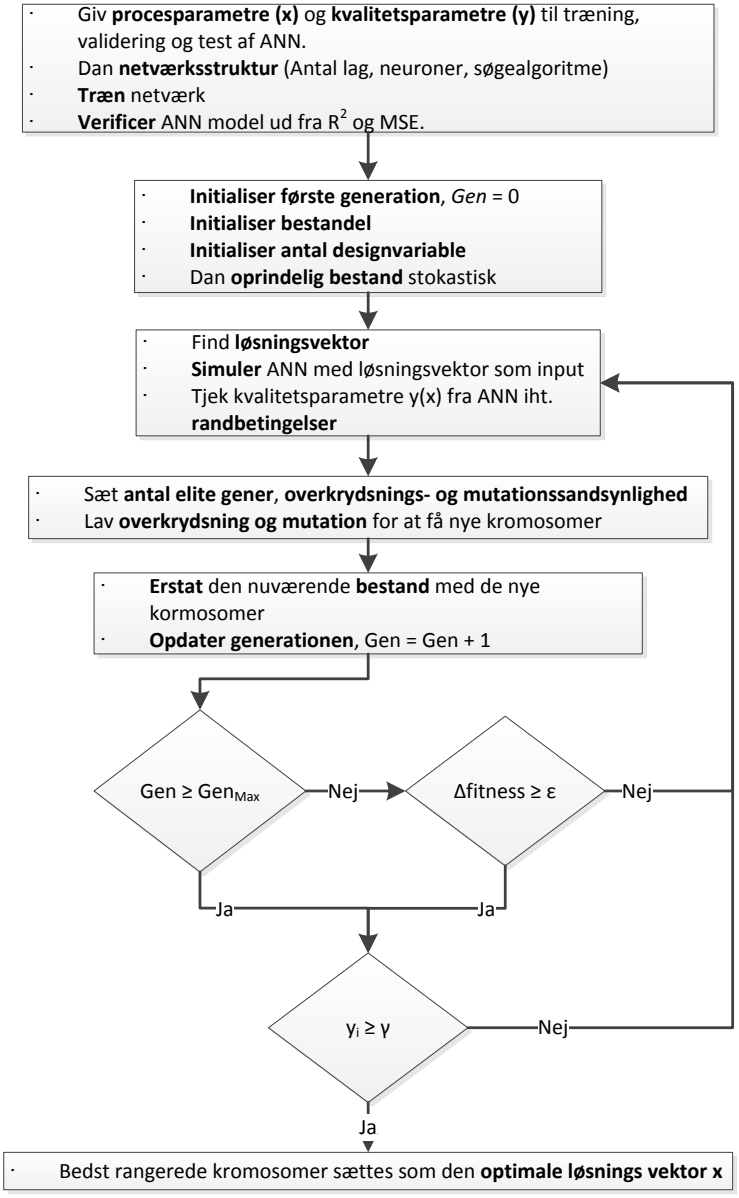
12.3 Optimering

I dette tilfælde ønskes skærehastigheden maksimeret og skægget og hjørnetolerancen top og bund ønskes minimeret. Objektfunktionen indeholdende de kvalitetsparametre som minimeres og skærehastigheden som maksimeres er vist i ligning 12.1. Hjørnetolerancerne er vægtede med 1/100, for at sikre at skægget og hjørnetolerancerne vægtes ligeligt. Dette skyldes at hjørnetolerancerne kan antage betydeligt højere værdier end skægget, og bidrage til en betydeligt større forbedring af objektfunktionens egnethed. Yderligere divideres 1 med skærehastigheden for at denne maksimeres, og efterfølgende multipliceres med 10000, for at denne vægtes betydeligt højere end kvalitetsparametrene. Denne vægtning skyldes at kvalitetsparametrene ønskes minimeret, men ikke på bekostning af skærehastigheden.

$$f(\mathbf{X},\mathbf{Y}) = \frac{1}{x_7} \cdot 10000 + \frac{|y_1|}{10} + \frac{|y_4|}{100} + \frac{|y_5|}{100} \tag{12.1}$$

Betingelserne for den genetiske algoritme er vist i tabel 12.1. Randbetingelserne fra tabel 12.4, er benyttet til stokastisk at danne den oprindelige bestand i intervallet mellem disse randbetingelser. Dette for at sikre at hele parameterrummet søges, således algoritmen ikke konvergerer til en lokal løsning.

Konvergenskriterierne for optimeringen er vist i tabel 12.2. Der er ikke sat nogen begrænsning på tiden eller egnetheden af kromosomerne. Dermed konvergerer algoritmen kun ved at gennemgå antallet af generationer, eller ved at randbetingelserne for kvalitetsparametrene overholdes med en tolerance tilsvarende



Figur 12.1: *Flowchart over hybridmetodens virkemåde.*

Betingelse	Værdi
Bestanddel	40
Elite	2
Overkrydsningsfraktion	0.8
Muteringsfraktion	0.2

Tabel 12.1: *Betingelser for den genetiske algoritme.*

γ. Derudover kan algoritmen konvergere ved, at den gennemsnitlige egnethed er under ε i Gen_ε antal generationer.

Konvergenskriterium	Værdi
Gen_{Maks}	1000000
Tid	∞
Egnethed	-∞
γ	$1 \cdot 10^{-6}$
Gen_ε	50
ε	$1 \cdot 10^{-6}$

Tabel 12.2: *Konvergenskriterier for den genetiske algoritme.*

Disse randbetingelser er vist i tabel 12.3. Randbetingelserne for skærebredden er valgt således det er muligt at skære den geometri fra arbejdstegningen i bilag F.1, som stiller det største krav til skærebredden. Denne geometri er en radius på 0,3 mm på detalje C, D og E på arbejdstegningen. Den største skærebredde fra laserskæringsforsøgene er på 166 μm, hvilket er langt fra 300 μm. Dette betyder at procesparameterindstillingen skulle resultere i en skærebredde på mere end 166 μm, ville sandsynligheden for at denne værdi er korrekt, være meget lille grundet neurale netværks begrænsede evne til at ekstrapolere. Den stansede hjørnetolerance i toppen er begrænset til den mindste målte hjørnetolerance under laserskæringsforsøgene på -1626 μm^2, istedet for gennemsnittet af Grundfos' stansekvalitet på -2044 μm^2.

Måleparameter	Laserskæring	Stansning
Skæg [μm]	$0 \leq y_1 \leq 5.25$	$0 \leq y_1 \leq 19.05$
Skærebredde top [μm]	$1 \leq y_2 \leq 160$	$1 \leq y_2 \leq 160$
Skærebredde bund [μm]	$1 \leq y_3 \leq 166$	$1 \leq y_3 \leq 166$
Hjørnetolerance top [μm^2]	$-69 \leq y_4 \leq 67$	$-1626 \leq y_4 \leq 0$
Hjørnetolerance bund [μm^2]	$-175.5 \leq y_5 \leq 0$	$-179 \leq y_5 \leq 0$

Tabel 12.3: *Randbetingelser for måleparametrene.*

Randbetingelserne for procesparametrene, som under optimeringen benyttes som designvariable, er blot de største og mindste værdier benyttet under laserskæringsforsøgene. Disse værdier er vist i tabel 12.4, og er valgt for at undgå at det neurale netværk ekstrapolerer.

Designvariabel	Randbetingelse
Dysediameter [mm]	$0.8 \leq x_1 \leq 2.5$
Fokus offset [mm]	$-2 \leq x_2 \leq 0$
Gastryk [bar]	$2 \leq x_3 \leq 15$
Pulspause [ms]	$0 \leq x_4 \leq 3$
Pulsvarighed [ms]	$0 \leq x_5 \leq 3$
Effekt [W]	$250 \leq x_6 \leq 500$
Skærehastighed [mm/min]	$280 \leq x_7 \leq 25000$

Tabel 12.4: *Randbetingelser for procesparametrene.*

12.4 Resultater

Resultaterne fra optimeringen er vist i tabel 12.5, hvor der er optimeret med randbetingelser svarende til hhv. Grundfos' stanse- og laserskæringskvalitet. I tabellen angiver de parameterværdier med fed, en randbetingelse som ikke er overholdt. Der er udført to optimeringer med hhv. Grundfos' stansekvalitet og laserskæringskvalitet som randbetingelser. Umiddelbart er hastigheden forøget betydeligt fra 495-1160%, dog er alle krav til kvalitetsparametrene ikke opfyldt, eftersom hjørnetolerancen i bunden ved laserskæring er mindre end tilladt. Sammenholdes optimeringsresultaterne fremgår det at hjørnetolerancen i toppen burde kunne overholdes ved brug af laserskæringskvaliteten som randbetingelse, eftersom denne overholdes ved brug af stansekvaliteten, og forskellen mellem de resterende kvalitetsparametre er lille.

Parameter	Laserskæring	Laserskæring	Stansning	Stansning
Dysediameter [mm]	1,1	0,9	0.8	2,2
Fokus offset [mm]	-1,24	-1,5	-1,4	-0,9
Tryk [bar]	12,2	12	13	6,1
Pulspause [ms]	0	0	0	0
Pulsvarighed [ms]	0	0	0	0
Effekt [W]	266	334	307	358
Skærehastighed [mm/min]	6930	12330	8226	16200
Hastighedsforøgelse [%]	495	880	588	1160
Skæg [μm]	$5 \cdot 10^{-4}$	18,8	17	0
Skærebredde top [μm]	93	100	99	98
Skærebredde bund [μm]	75.1	83,4	88,6	79,8
Hjørnetolerance top [μm^2]	**-952**	**-1056**	-275	-1299
Hjørnetolerance bund [μm^2]	$-1,2 \cdot 10^{-3}$	0,0	$-3 \cdot 10^{-3}$	-179

Tabel 12.5: *Optimale procesparametre og tilhørende måleparametre begrænset af randbetingelser givet ved hhv. Grundfos' laserskærings- eller stansekvalitet fra tabel 12.3.*

En sammenligning af kvalitetsparametre og tilhørende procesparametre er beskrevet i det følgende, for optimeringen ud fra stansekvaliteten med en skærehastighed på 16200 mm/min, og den statistiske analyse af databasen.

Skæg
Optimeringsresultaterne ved den højeste skærehastighed 16200 mm/min stemmer generelt ikke overens med resultaterne fra kapitel 11. Resultaterne viser at en hastighed på mere end 15625 mm/min giver intet eller næsten intet skæg, mens en hastighed på mellem 3125 og 15625 mm/min giver skæg i en længde mellem 50 og 100 μm uden pulsering, som vist på figur 11.15. Yderligere er gastrykket lavere end 10 bar, hvilket burde frembringe skæg. En yderligere diskretisering af gastryksniveauer er dog nødvendig, da figur 11.15 kun viser en lineær sammenhæng mellem et gastryk på 2 bar og 10 bar. Fokusoffsettet burde iht. figuren være indstillet til 0 mm, for at undgå skæg.

Skærebredde Skærebredden bund stemmer nogenlunde overens for samtlige parametre, hvis skærebredden og procesparametrene fra optimeringen sammenholdes med figur 11.13. Det samme gør sig gældende for skærebredden top ved aflæsningen af denne kvalitetsparameter på figur 11.11, for den optimerede procesparameterindstilling.

Hjørnetolerance En lav hjørnetolerancen bund stemmer overens med stor dysediameter ifølge figur 11.9.

Fokusoffsettet burde være 0 mm for at give en lav hjørnetolerance bund og et gastryk på nærmere 10 bar. Ved at se på resultaterne fra ANOVA, figur 11.7 vil den fundne hjørnetolerancen give en indstilling af fokusoffset på -1 mm, og dette er hvad optimeringen næsten giver med sin -0,9 mm for fokusofset. Ifølge figuren burde dysediameteren være lav, og ikke 2,2 mm som for optimeringen. Gastrykket bør ifølge figuren være højere eller lavere end 10 bar for at få den ringeste hjørnetolerance, dette er tilfældet for optimeringens gastryk. Ud fra figuren burde effekten være højere for at få en ringe hjørnetolerance top på omkring -1299 mm^2.

Denne sammenligning af kvalitetsparametre og procesparametre fra optimeringen og den statistiske analyse, bygger på at den statiske analyse er valid. Yderligere er der ikke kommenteret på vekselvirkningernes eventuelle indvirkninger på kvalitetsparametrene, hvorfor sammenligningen ikke nødvendigvis er entydig.

Diskussion og delkonklusion 13

Metoderne benyttet til hhv. parameterrelatering med en empirisk procesmodel og optimering, er valgt ud fra tidligere benyttede metoder til kvalitetsforbedring af skæreprocesser. Disse to metoder er benyttet som en hybridmetode, der har været anvendt til forskellige formål som inkluderer optimering af virkningsgraden for en kemisk reaktor [Amin og Istadi, 2012], laserskæringskvalitet [Tsai et al., 2008] og mængden af fjernet materiale pr. tidsenhed ved gnistbearbejdning, som skærehastigheden afhænger af [Zhang et al., 2008]. Den benyttede hybridmetode anvender et neuralt netværk til parameterrelatering og genetisk algoritme til optimering.

Den empiriske model er trænet på et datasæt, hvor bestemte parameterniveauer er dårligt repræsenteret. Dette gælder f.eks. data med høje hastigheder og lav effekt. Dette skyldes at ikke alle skæringer er gennemskårne, og at ikke alle forsøg med taguchi forsøgsdesign blev udført. Dette har resulteret i en høj forudsigelsesfejl på 44,1%, da det enten har været nødvendigt at overtræne netværket, eller beholde evnen til at generalisere og forringe evnen til at repræsentere det trænede datasæt. Det er forsøgt at vælge et kompromis, som udviser tegn på overtræning og manglende evne til at generalisere. Skulle netværket have haft en bedre generaliseringsevne, skulle en netværksarkitektur med færre neuroner være valgt.

Valget af netværksarkitektur er foretaget ud fra en systematisk undersøgelse af forudsigelsesfejlen, afhængigt af opdelingen af datasættet til trænings-, valideringss- og testsæt samt antal af neuroner. Forudsigelsesfejlen er dog et gennemsnit af samtlige af netværkets output for samtlige kvalitetsparametre for alle datasæt. Istedet burde valget være foretaget ud fra et gennemsnit af den forudsigelsesfejl, for de datasæt anvendt til træning, samt et gennemsnit af forudsigelsesfejlen, for de datasæt anvendt til test og validering. En systematisk undersøgelse, af antallet af lags indflydelse på forudsigelsesfejlen og deres overføringsfunktioner, burde være foretaget. Dette ville dog være tidskrævende, eftersom en forøgelse af antallet af lag og neuroner, giver en længere optimeringstid af netværket.

Et af problemerne ved det mangelfulde datasæt er opdelingen af datasættet til et trænings-, valideringss- og testsæt. Ved opdelingen vil der være data som netværket ikke trænes på, da disse data vil være i test- eller valideringssættet. Således vil der være sammenhænge mellem parametrene, som netværket ikke er i stand til at repræsentere. Netværket kan yderligere risikere at skulle ekstrapolere, såfremt datapunkter ikke forefindes i træningssættet men i valideringss- eller testsættet. Dette vil forringe netværkets evne betydeligt, og er sandsynligt for det anvendte netværk grundet det mangelfulde datasæt.

For at få en lav forudsigelsesfejl burde et fuldfaktorforsøg være udført, hvor samtlige skæringer var gennemskårne. Efterfølgende kunne optimeringsalgoritmen bayesiansk regularisering være benyttet, til at udnytte hele datasættet til træning. Således ville der ikke være datapunkter som ikke ville være repræsenteret, og en eftervisning af modellen kunne foretages, ved at give modellen forskellige sæt af procesparametre og fysisk eftervise kvalitetsparametrene ved laserskæringsforsøg. Dette ville kræve omhyggeligt afgrænsede parameterniveauer, således de indledende forsøg ville blive mere tidskrævende. Et problem ville dog være, at hvis en høj skærehastighed ønskedes, og alle skæringer kræves gennemskårne, vil parameterni-

veauerne blive begrænset betydeligt. Yderligere kunne et lille kompromis på hastigheden muligvis give en kvalitetsmæssig forbedring, men ville ikke kunne ses hvis dette var uden for parameterrummet. De indledende forsøg bør under alle omstændigheder, udføres og planlægges mere omhyggeligt, for at få bedre resultater til den empiriske procesmodel.

De procesparameterindstillinger som optimeringen konvergerer mod, kan have både bedre kvalitet og en hurtigere skærehastighed. Benyttes procesparametrene er der en risiko for at skæringen ikke er gennemskåren. Dette skyldes at netværket ikke er trænet, til at forudsige hvorvidt skæringen er gennemskåren eller ej. Var et fuldfaktor forsøg blevet udført hvor alle skæringer var gennemskåret og hele datasættet var anvendt til træning, ville dette ikke have været et problem.

Til trods for den høje forudsigelsefejl det neurale netværk har, er netværket i stand til at vise de samme sammenhænge mellem proces- og kvalitetsparametre, som hovedeffekterne fra den statistiske analyse har vist. Hastigheden og effekten for det neurale netværk afviger dog fra hovedeffekterne fundet ved statistisk analyse. Afvigelsen skyldes at disse er repræsenteret seperat for pulserede og kontinuerlige forsøg, mens det neurale netværk er baseret på data fra begge forsøg. Sammenhængene er overskueliggjort i tabel 11.3 og stemmer overens med sammenhænge fra tidligere publicerede forskningsresultater der er vist i tabel 5.3. Relationerne er dog ikke nødvendigvis valide, da disse er baseret på hovedeffekterne fundet ved variansanalyse. Denne variansanalyse kræver en faldende grad af vekselvirkninger ved faldende fraktion af faktorforsøg. I kapitel 7 er der påvist vekselvirkninger, samtidig er datasættet for de kontinuerlige laser forsøg baseret på et stærkt reduceret faktorforsøg.

Fire optimeringer er foretaget, hvor optimeringerne overholder hhv. randbetingelser for stansekvaliteten og laserskæringskvaliteten. Det var muligt at opnå højere skærehastigheder ved brug af stansekvaliteten som randbetingelser, hvilket skyldes at Grundfos' laserskæringskvalitet er betydeligt bedre end stansekvaliteten. Generelt stemmer de optimerede resultater for den højeste hastighed, ikke overens med hovedeffekterne for kvalitetsparametrene ved sammenligning med variansanalysen. Indstillingen af procesparametrene ud fra variansanalysen vil give flere lokalt optimerede løsninger, hvis procesparametrene indstilles efter graferne for hovedeffekterne. Vælges et højt tryk fordi dette ifølge graferne giver lidt skæg, resulterer dette i en bred skærebredde, således er en lokal løsning fundet. Ved at benytte den empiriske model i samspil med optimeringen, vil denne metode være i stand til, at finde en global nær-optimal løsning ud fra objektfunktionen. Ved at ændre objektfunktionen og vægte kvalitetsparamtrene fås forskellige globale nær-optimale løsninger der afhænger af objektfunktionen.

Grundfos' statorlameller er skåret ved pulsering. Dette er dog underordnet, såfremt det er fysisk muligt at eftervise de optimererede parametre. Hvis dette er tilfældet, kan statorlamellerne laserskæres ved en højere hastighed og en bedre kvalitet. Under sammenligningen mellem Grundfos paramterne og de optimerede parametre, er der ikke taget højde for at der er anvendt to forskellige laserceller, og det kan være muligt at Grundfos kører med paramter der ligger uden for det undersøgte parameterrum.

Afrunding

III

14 Konklusion

14.1 Opbygning af database

For at kvantifisere laserskærekvaliteten, blev der taget udgangspunkt i standarden [DS/EN ISO 9013, 2002], for at opnå kvalitetsparametre, der kunne sammenlignes med andres erfaringer. Det viste sig dog at der kunne opnås mere præcise målemetoder med flere målepunkter på kortere tid, ved at modificere disse. For at sammenligne Grundfos' stansekvalitet, blev to emner fra Grundfos analyseret. Et der var laserskåret og et der var stanset. Analysen af de to emner, indikerede ingen forskel i de magnetiske egenskaber, da begge emner indikerede et område på 20 μm, fra skærefladen og ind i emnet, der var påvirket af skære- og stanseprocessen. De geometriske tolerancer, var betydeligt bedre for det laserskårne emne for samtlige af de målte kvalitetsparametre. For at kunne indsamle empiriske data, blev en forsøgsstruktur designet og forsøgt udført, dog med mindre afvigelser. Det blev valgt at udføre et reduceret faktor forsøg, og derpå blev der fortaget statistisk variansanalyse (ANOVA) for at undersøge sammenhænge mellem procesparametre og kvalitetsparametre. Der blev udført et fuld faktorforsøg for at klarlægge sammenhængen mellem pulsering, og de valgte kvalitetsparameter, og herpå blev vekselvirkning og hovedeffekter undersøgt. De analyserede resultater viste sig at stemme overens med forskning med lignende formål fra tabel 5.3. De indledende forsøg spillede en større rolle end tillagt, og skulle være brugt til at undersøge valget af procesparametre og kvalitetsparametre, samt sikre en bedre afgrænsning og diskretisering af procesparametrene. Isåfald ville resultaterne give en mere valid analyse og et mere uniformt repræsenteret procesparameterrum uden svejsninger. For at reducere tiden og måleusikkerhederne ved indsamling af kvalitetsparametrene, er der blevet udviklet billedbehandlings programmer til at udføre disse målinger. Der blev ikke observeret nogle fejlmålinger under indsamlingen af kvalitetsparametrene, og det antages derfor at metoden har været bedre end hvad der kunne have været gjort ved manuel måling. Det viste sig at indstillingen og fokuspunktet havde betydelig indflydelse på målingerne.

14.2 Parameterrelatering og -optimering

For at opbygge en empirisk procesmodel, er forskellige metoder undersøgt, og det blev herpå valgt at anvende ANN. Opbygningen af ANN blev undersøgt systematisk, for at være sikker på at opnå en netværksarkitektur der med rimelighed kunne beskrive databasen. Den empiriske procesmodel er sammenlignet med de statistiske resultater, for derved at eftervise modellens evne til at repræsentere databasen. Modellen var ud fra sammenligningen i stand til at repræsentere databasen, forudsigelsesfejlen for modellen var dog 44,1%, hvilket er meget højt. Dette kan skyldes at visse procesparameterindstillinger er repræsenteret med meget få forsøg, grundet et fraktions forsøg hvor alle skæringer ikke er gennnemskårne. Det var muligt at optimere skærehastigheden ved brug af den probabilistiske optimeringsalgoritme genetisk algoritme. Den optimerede skærehastighed var på 16200 mm/min, som er 1160% hurtigere end Grundfos' nuværende skærehastighed. Kvalitetsparametrene ved den optimerede skærehastighed er bedre

end grundfos' stansede kvalitet for samtlige parametre pånær hjørnetolerancen bund. Ved den optimerede hastighed er graterne fra stansningen fjernet, og hjørnetolerancen top er forbedret betydeligt. I forhold til laserskæringskvaliteten er mængden af skæg reduceret, hjørnetolerancen top er dog omtrent en faktor 18,9 ringere, mens forskellen på hjørnetolerancen bund er lille. Det vil kræve en fysisk eftervisning med laserskæringsforsøg, for at sikre at disse optimerede kvalitetsparametre er korrekte for denne procesparameterindstilling. Dette vil samtidig være en eftervisning af den empiriske procesmodel.

Resume

15

This master thesis is written at Aalborg University, at the department of Mechanical and Manufacturing Engineering. The purpose of the project is to optimize the laser cutting speed, when cutting statorplates from Grundfos, in order to use laser cutting for stator plate production and not just manufacturing of prototypes. To do so the project was divided into two parts. Part I focuses on analyzing the statorplates and collecting data from the laser cutting process, in order to build a laser cutting database. Part II focuses on building an empirical model, on the data collected, which is afterwards used with an optimization algorithm, to optimize the cutting speed.

Part I

Before the data colletion could take place, the process parameters to adjust, and the quality parameters to measure need to be selected. This was done based on laser cutting theory, and a study of previous work in the field of laser cutting. The chosen number of parameters required a consideration of the method Design of Experiments, due to the time consumption of carrying out experiments changing every process parameter one at a time. A factorial experiment was used to collect data on some of the process parameters, and a full factor experiment was used for pulsed laser cutting. The data was analyzed with ANOVA, and quality of the data was based on this. ANOVA was also used to find the significant processparameters, how they affected the quality parameters, and the interactions among process parameters. The collection of data was done by designing and building Computer Vision programs. This was done to minimize human influence on the measuring process, and automate the measuring methods.

To be able to compare the quality of a cut from the optimization of the cutting cutting speed, the quality of the lasercut and punched statorplate was analyzed and compared. The comparison was made based on the geometry and the impact from the manufacturing processes on the magnetic properties. The comparison showed better geometry when using laser cutting, and nothing indicated a difference in the magnetic properties between the two parts.

Part II

Different empirical models was examined, and Artificial Neural Networks was selected. When the database was obtained a construction of the empirical model was done. The construction of the network was carried out in a systematic way, to ensure a good network structure was chosen, and the network was afterwards compared with the results from the ANOVA. It was shown that the two models gave nearly the same representation of the database. The prediction accuracy of the neural network was however poor, due to a lacking ability of generalization. This meant that the network represented the data it was trained on well, but it generalized new examples poorly. The optimization was carried out by using a genetic algorithm. Grundfos is currently cutting with a speed of 1400 mm/min, and that was the reference point for the optimization. The geometric tolerances found in the analysis of the Grundfos statorplate was used as

constraints for the optimization. The results of the optimization showed a significant improvement of the cutting speed from 1400 mm/min, to 16200 mm/min. The quality of the cut was improved compared to the current punching quality. The model is however dependent on the parameters used to train the model and needs physical experiments as verification to ensure the quality of the cut.

Litteraturliste

IV

Litteratur

[Acherjee et al., 2011] *Applied Soft Computing 11*. Application of artifical neural network for predicting weld quality in laser transmission welding of thermoplastics. Bappa Acherjee, Subrata Mondal, Bipan Tudu og Dipten Misra. 2011.

[Amin og Istadi, 2012] N. Amin og I. Istadi. *Different Tools on Multi-Objective Optimization of a Hybrid Artificial Neural Network - Genetic Algorithm for Plasma Chemical Reactor Modelling*. 2012.

[Arora, 2004] Jasbir Arora. *Introduction to Optimum Design*. 3st Edition. Academic Press, 2004.
ISBN: 0123813751.

[Belhadj et al., 2001] *Journal of magnetism and magnetic materials 256 (2003) 20-31*. Effect of laser cutting on microstructure and on magnetic properties of grain non-oriented eletrical steels. A. Belhadj et al. 2001.

[Bohrer et al., 1999] *SPIE Vol. 3833*. Managing quality control of laser machining. Markus Bohrer, Georg Hutflesz, Manfred Bammer og Stephan Fazeny. 1999.

[Caristan, 2004] Charles L. Caristan. *Laser Cutting Guide for Manufacturing*. Society of Manufacturing Engineers, 2004, 1. udgave.
ISBN: 978-0-87263-686-6.

[Caydas og Hascalik, 2008] *Optics & Laser Technology 40*. Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. Ulas Caydas og Ahmet Hascalik. 2008.

[DS/EN 10106, 2007] Koldvalsede elektroplader og -baand uden kornorientering leveret efter udgloedning, 2007.

[DS/EN ISO 9013, 2002] Ds/en iso 9013 svejsning - termisk skaering - klassifikation af termisk skaarne flader - geometrisk produktspecifikation og kvalitetstolerancer, 2002.

[Dubey og Pandey, 2012] *Optics and Lasers in Engineering 50*. Taguchi based fuzzy logic optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of duralumin sheet. Arun Kumar Pandey og Avanish Kumar Dubey. 2012.

[Dubey og Pandey, 2012] *Optics and Laser Technology 44*. Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet. Arun Kumar Pandey og Avanish Kumar Dubey. 2012.

[Dubey og Yadava, 2008] *Optics & Laser Technology*. Multi-objective optimisation of laser beam cutting process. Avanish Kumar Dubey og Vinod Yadava. 2008.

[Eltawahni et al., 2012] *Optics & LaserTechnology 44*. Effect of co2 laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of aisi316l. H. A. Eltawahni, M. Hagino, K.Y. Benyounis, T. Inoue og A.G. Olabi. 2012.

[Ghany og Newishy, 2005] *Journal of Materials Processing Technology 168*. Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and cw nd:yag laser. K. Abdel Ghany og M. Newishy. 2005.

[Hsu, 2010] Chih-Wei Hsu. *A Practical Guide to Support Vector Classiffication*, 2010.

[IPG, 2013] IPG Photonic. Datablad for ipg laser, 2013.
URL: `http://www.ipgphotonics.com/apps_materials_multi_yls.htm`.

[Jens V. Boll, personlig samtale] Jens V. Boll. 2013.

[Juang og Tarng, 2002] *Journal of Materials Processing Technology 122*. Process parameter selection for optimizing the weld pool geometry in the tungsten inert gas welding of stainless steel. S.C. Juang og Y.S. Tarng. 2002.

[Kek og Grum, 2009] *International Journal of Machine Tools & Manufacture 49*. Monitoring laser cut quality using acoustic emission. Tomaz Kek og Janez Grum. 2009.

[Kuka, 2013] Kuka Systems. Datablad for kuka robot, 2013.
URL: `www.kuka-systems.com/en/`.

[Kuo et al., 2011] *Optics & Laser Technology*. Application of an lm-neural network for establishing a prediction system of quality characteristics for the lgp manufactured by co_2 laser. C.-F. J. Kuo et al. 2011.

[MATLAB, 2013] MATLAB. *MATLAB Technical Documentation, Function Approximation and Nonlinear Regression*, 2013.

[Mitchell, 1997] Tom Mitchell. *Machine Learning*. McGraw Hill, 1997, 1. udgave.
ISBN: 0070428077.

[Montgomery, 2013] Douglas C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. Singapore : John Wiley & Sons, 2013, 8. udgave.
ISBN: 9781118097939.

[Morimoto et al., 2000] *Computers and Electronics in Agriculture 26 (2000) 171-186*. Pattern recognition of fruit shape based on the concept of chaos and neural networks. T. Morimoto et al. 2000.

[Moses og Loisos, 2005] *Journal of Materials Processing Technology 161*. Effect of mechanical and nd:yag laser cutting on magnetic flux distribution near the cut edge of non-oriented steels. George Loisos og Anthony J. Moses. 2005.

[Pietro og Yao, 1992] *Int. J. Mach. Tools Manufact. 34*. An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality - a review. P. D. Pietro og Y. L. Yao. 1992.

[Ray og Mukherjee, 2006] *Computers & Industrial Engineering 50*. A review of optimization techniques in metal cutting processes. Indrajit Mukherjee og Pradip Kumar Ray. 2006.

[Riveiro et al., 2010] *Applied Surface Science 257*. Effects of processing parameters on laser cutting of aluminium-copper alloys using off-axial supersonic nozzles. A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquinos og J. Pou R. Comesana. 2010.

[Steen og Mazumder, 2010] William M. Steen og Jyotirmoy Mazumder. *Laser Material Processing*. Springer-Verlag, 2010, 4. udgave.
ISBN: 978-1-84996-061-8.

[Trumpf, 2013] Trumpf. Datablad for trumpf laser, 2013.
URL: `http://www.trumpf.com/`.

[Tsai et al., 2008] *Journal of Material Processing Technology 208*. Optimal laser cutting parameters for qfn packages by utilizing artificial neural networks and genetic algorithm. Ming-Jong Tsai, Chen-Hao li og Cheng-Che Chen. 2008.

[Vogel et al., 2009] Celia Juhl og Ernst Maahn Conrad Vogel. *Metallurgi for ingenioerer*. Polyteknisk Forlag, 2009, 9. udgave.
ISBN: 87-502-0930-2.

[Yilbas et al., 2008] *Optics and Lasers in Engineering 46*. Wedge cutting of mild steel by co_2 laser and cut-quality assessment in relation to normal cutting. B. S. Yilbas, C. Karatas, I. Uslan, O. Keles, Y. Usta, Z. Yilbas og M. Ahsan. 2008.

[Zhang et al., 2008] *Journal of Zheijiang University Science A 9*. Parameter optimization model in electrical discharge machining process. Qin he Zhang et al. 2008.

Bilag

V

Indhold

A Lasere **5**

B Systemdynamik **7**

C Tilslutning af laser **13**

C.1 Tilslutning 13

C.2 Opsætning 14

C.3 Laser kalibrering 14

C.3.1 Fokuspunkt 14

C.3.2 Reel effekt 16

C.3.3 Gasdyse centrering 16

D Anova **19**

D.1 Vekselvirkninger 20

E Billedeanalyse **27**

E.1 Skærebreddeopmålingsprogram 27

E.1.1 Brugerflade 27

E.1.2 Skærebreddeopmåling 28

E.1.3 Placering af data i database 30

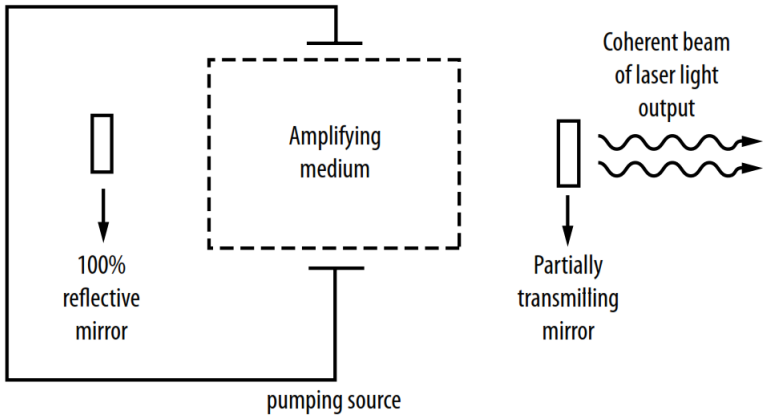
F Arbejdstegning for stator **33**

G DVD index **35**

Lasere

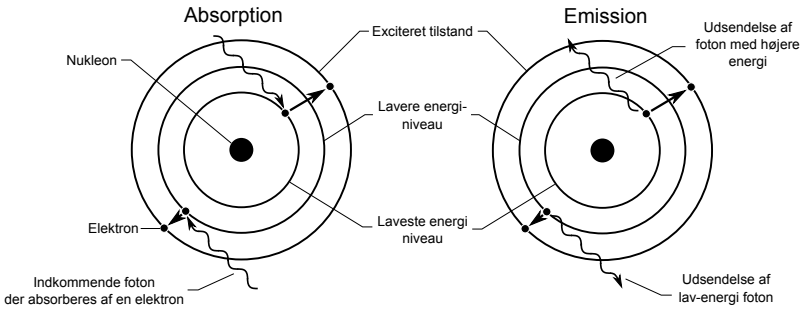
A

Dette kapitel tager udgangspunkt i teorien beskrevet i [Steen og Mazumder, 2010]. En laser er grundlæggende opbygget af en pumpe, en kavitet indeholdende et aktivt medium og en optisk resonator som blot er to spejle. Den generelle opbygning fremgår af figur A.1. Pumpen leverer kontinuerligt energi til det aktive medium, som forstærker energien ved at frigive energi i form af lys. Lyset reflekteres frem og tilbage mellem de to spejle, hvoraf det ene er fuldt reflekterende og det andet kun er delvist reflekterende. Lyset oscillerer mellem de to spejle, hvor det delvist reflekterende spejl gradvist tillader lyset at forlade kaviteten som laserstråle.



Figur A.1: *Grundlæggende princip og opbygning for funktionen af lasere [Steen og Mazumder, 2010].*

På atomart niveau fungerer laseren ved, at et stimulerende foton fra pumpen, med en tilstrækkelig energitilstand, rammer og exciterer et atom i det aktive medium. Et atom i en exciteret tilstand har et højere energiniveau end naturligt forekommende i grundtilstanden, og kan ikke bestå i denne tilstand, hvormed emission af energi som et foton finder sted. Atomet vil enten kunne frigive et højt energiniveau og skifte til grundtilstanden, eller frigive et lavere energiniveau og gå til en lavere exciteret tilstand, som det fremgår af figur A.2.



Figur A.2: *Til venstre absorption ses af et atom og til højre emission af et foton.*

Bølgelængden af strålen har indvirkning på, hvor stor en mængde som reflekteres eller absorberes og

opvarmer emnet. Jo kortere bølgelængde, desto flere fotoner kan absorberes og jo finere fokus opnås [Steen og Mazumder, 2010]. Bølgelængden af strålen er inverst proportional med energien og vil ved en lav bølgelængde, nemmere blive absorberet af elektroner og derved opvarme en overflade. Bølgelængden λ afhænger af mængden af energi E, som frigives ved stimuleret emmission, dvs. energifaldet ud fra følgende ligning hvor h er Plancks konstant og c er lysets hastighed:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \tag{A.1}$$

Når en laserstråle rammer en overflade, reflekteres eller absorberes strålen. Strålens fotoner absorberes af elektroner, som derved begynder at vibrere. Elektronen vil enten genudstråle og dermed reflektere laserstrålen, eller blive holdt tilbage af bindingsenergien i molekylerne. I sidstnævnte tilfælde spredes vibrationerne ud i de omkringliggende molekyler gennem bindingerne, og bliver til varme. Molekylernes bindinger kan forlænges ved vibrationerne, således de mister deres mekaniske styrke og materialet smelter. Ved yderligere opvarmning fordamper emnet, og vil ved forsat eksponering blive til plasma [Steen og Mazumder, 2010].

Pumpen kan benytte sig af en hvilken som helst energikilde. Typiske kilder indbefatter dog jævnstrøm eller radiofrekvens (RF) strømforsyninger til gaslasere. Fokuserede pulserende lysstråler benyttes til Nd:YAG eller faststof lasere hvor frie elektron og halvleder lasere benytter elektron strømme, og jod-lasere benytter kemiske reaktioner. Et hvilket som helst materiale uafhængigt af tilstand kan i teorien benyttes som aktivt medie, pumpekildens energiniveau skal være højt nok til at kunne sikre stimuleret emission i det aktive medium, og hermed et energifald. Output energien er proportional med pumpekildens energiniveau, eller mængden af det aktive medium [Steen og Mazumder, 2010].

Lasere klassificeres afhængigt af det aktive medie, dvs. gaslasere indbefatter CO og CO_2 lasere. Lasere indeles typisk i fire kategorier, gas, faststof, organisk farve eller frie elektron lasere. Afhængigt af lasertypen opnås forskellige nyttevirkninger og bølgelængder for laserstrålen. De mest anvendte lasere i industrien til materiale forarbejdning indbefatter CO_2, Nd:YAG og fiberlasere som sammen med andre typiske industrielle lasere er opgivet i tabel A.1 med tilhørende karakteristika.

Kategori	Type	Bølgelængde [μm]	Kvanteeffektivitet [%]	Nyttevirkning [%]
Gas	CO_2	10.6	45	12
	CO	5.4	100	19
	Excimer	1.06	40	4
Faststof	Nd:YAG	1.06	40	2
	Nd:Glass	1.06	40	8 - 12
	Fiber	1.06		20
	Diode-pumpet YAG	0.75 - 0.87	80	50
	Diode GaAs	0.54	80	50
	Diode GaP	0.248	80	0,5 - 2

Tabel A.1: *Lasertyper og tilhørende karakteristika [Steen og Mazumder, 2010].*

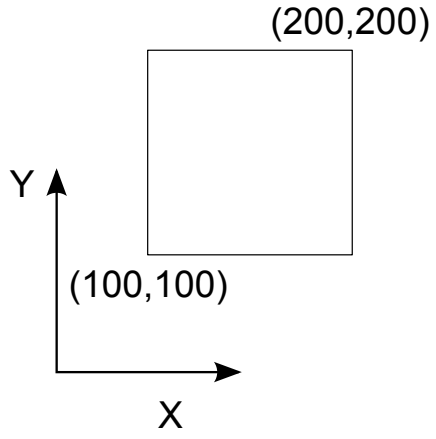
Systemdynamik

B

Da skærehastigheden styres af XY-bordet, er bordets dynamik en væsentlig faktor for skærekvaliteten. Bordets dynamiske egenskaber er opgivet for et standard setup, som kan findes på DVD G, da der er fastgjort fiksturer til bordet, er borderets nuværende egenskaber forringet af en ukendt grad. I dette afsnit undersøges bordets egenskaber med fiksturet vist i bilag C.

I dette projekt er det ikke ønsket at optimere bordets egenskaber, men det er dog relevant at finde de dynamiske egenskaber for bordet, for at kunne kompensere for disse. For at undersøge dynamikken, er et program skrevet i C#, for at logge bordets hastighed og position. Da samplingfrekvensen er ukendt, og det ikke vides om platformen Windows 7 CE kører realtid for C# programmer, er det usikkert om målingerne har samme tid som den ønskede position, hastighed og acceleration, da disse er givet på PLCen. Målingerne kan derfor ikke sige noget om der er en tidsforskydning af signalet. Det er dog muligt at se om positions-, hastigheds- eller accelerationssignalet afviger i værdi fra et stepinput.

For at være i stand til at se udsving i bordets dynamik, er en referencegeometri blevet defineret med tilhørende g-kode. Referencegeometrien kan ses på figur B.1. Der er blevet kørt i en firkant, startende i koordinat (100mm,100mm), og derefter med uret rundt til koordinat (200mm,200mm) og tilbage igen. For hver omgang er hastigheden blevet øget med 500 mm/min. Den anvendte g-kode, kan ses på figur B.2.

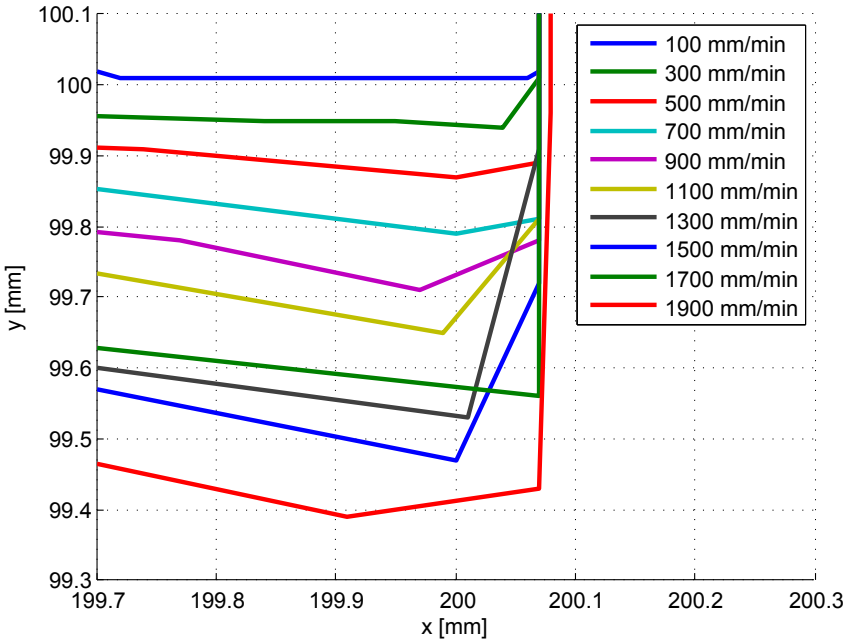


Figur B.1: *Positions reference for bordet.*

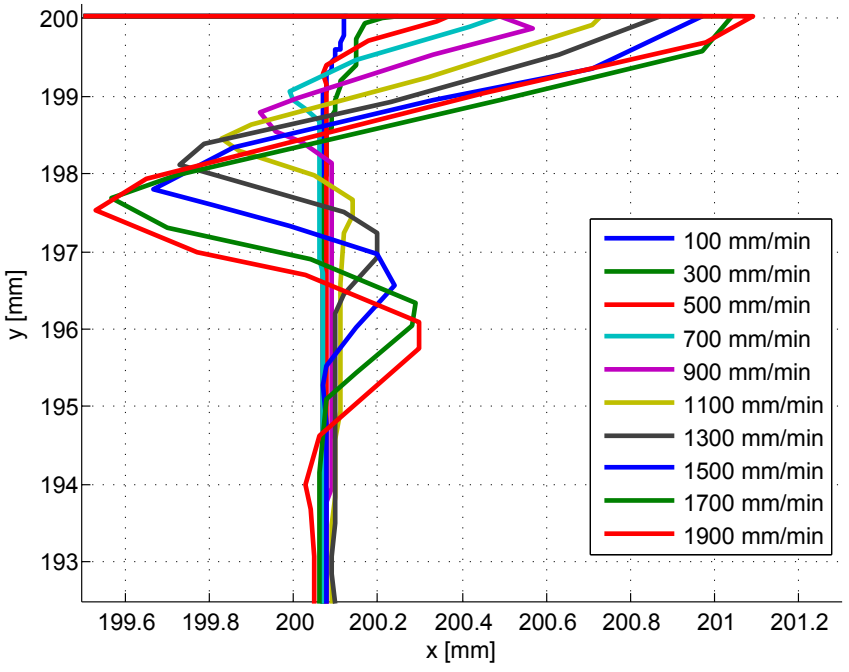
```
(Lasse og Emil Dynamik test)

R1=1000
R2=500

G01 X100 Y100 F=R1 (flyt til koordinat (100,100), med hastighed R1)
G01 X100 Y200 F=R1 (flyt til koordinat (100,200), med hastighed R1)
G01 X200 Y200 F=R1 (flyt til koordinat (200,200), med hastighed R1)
G01 X200 Y100 F=R1 (flyt til koordinat (200,100), med hastighed R1)
G01 X100 Y100 F=R1  (flyt til koordinat (100,100), med hastighed R1)
R1=R1+R2                    (øg hastighed med R2)
G04 X1                      (vent 1 sekund)
G01 X100 Y100 F=R1 (flyt til koordinat (100,100), med hastighed R1)
G01 X100 Y200 F=R1 (flyt til koordinat (100,200), med hastighed R1)
G01 X200 Y200 F=R1 (flyt til koordinat (200,200), med hastighed R1)
G01 X200 Y100 F=R1  (flyt til koordinat (200,100), med hastighed R1)
G01 X100 Y100 F=R1  (flyt til koordinat (100,100), med hastighed R1)
R1=R1+R2                    (øg hastighed med R2)
G04 X1                      (vent 1 sekund)

(gentag til ønsket max hastighed er opnået)
```

Figur B.2: *G kode til indsamling af hastighed og position.*

Fra kapitel 8, er det vurderet at flytningerne skal være inden for en tolerance på 0.05 mm, og at Grundfos i dag skærer med en hastighed på 1400 mm/min. For at undersøge hvorvidt det er muligt at skære ved denne hastighed, med en tolerance på 0.05 mm, undersøges bordets dynamiske egenskaber for hastigheder fra 100 mm/min til 2000 mm/min i inkrementer af 100 mm/min. Systemets dynamik undersøges omkring koordinaterne (200mm, 200mm) og (200mm, 100mm), for hhv. x- og y-retningen, som vist på figur B.3 og B.4.



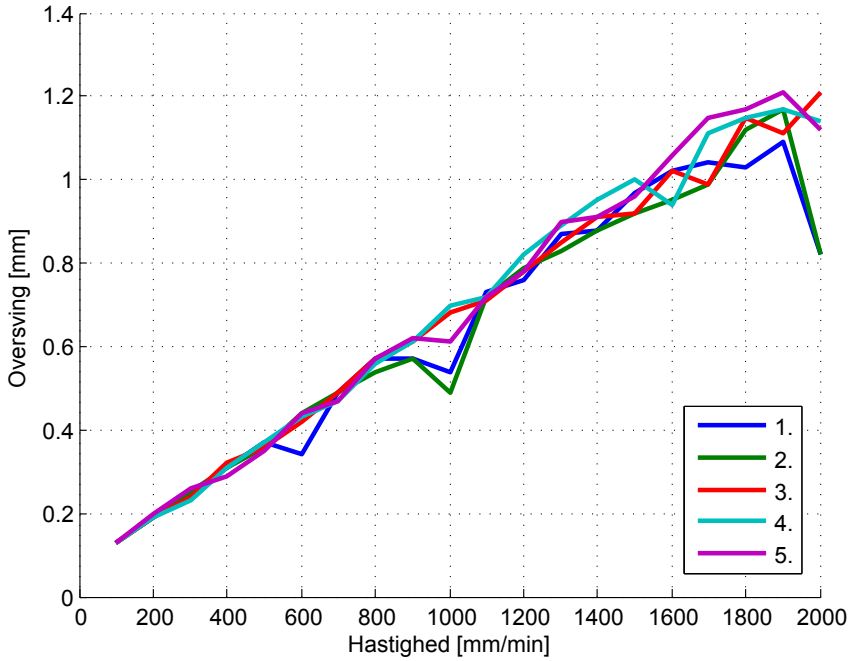
Figur B.3: *Oversving ved deceleration i y-retningen.*



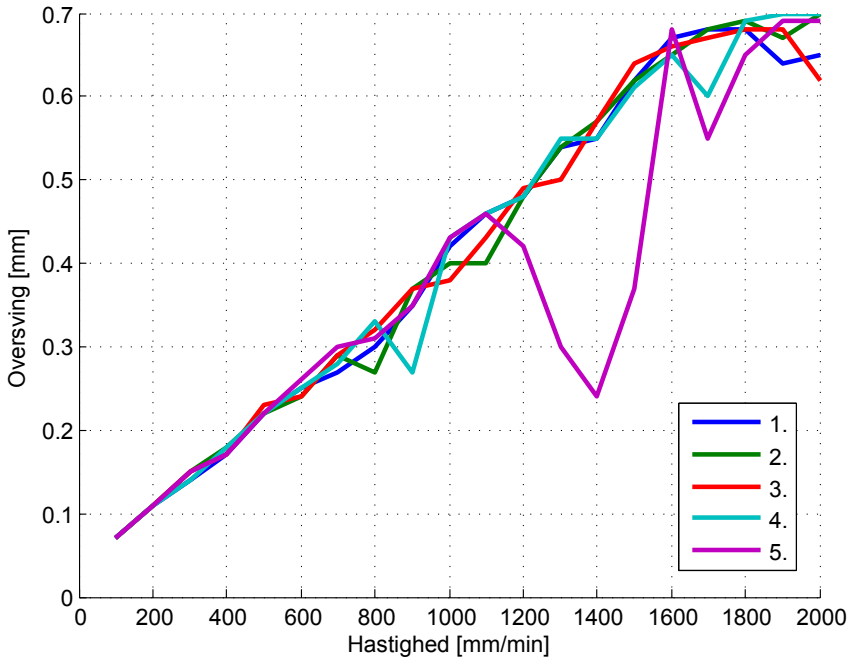
Figur B.4: *Oversving ved deceleration i x-retningen.*

På figur B.4 ses dynamikken ved en deceleration i x-retningen. Det fremgår at oversvinget øges i takt med en stigning i hastigheden, og ingen af de undersøgte hastigheder giver oversving på under 0.05 mm. På figur B.3 ses dynamikken ved en deceleration i y-retningen. Der ses samme tendens som ved x-retningen, med en stigning i oversvinget i takt med en hastighedsforøgelse. I y-retningen vil hastigheder lavere end 300 mm/min kunne overholde tolerancen på 0.05 mm. Ved sammenligning af de to akser ses det, at over-

svingene for x-aksen er større end for y-aksen. Det antages at dette kan skyldes, at aktuatoren for x-aksen flytter fiksturet og aktuatoren for y-aksen, mens y-aksens aktuator kun skal flytte fiksturet.
For at undersøge gentagelsesnøjagtigheden for systemet, er forsøget gentaget 5 gange. Det antages at oversvinget i x-retningen i punkt (200mm,200mm) er tilsvarende oversvinget i det modstående hjørne, og at oversvinget i y-retningen ved (200mm,100mm) er tilsvarende det modstående hjørne. Hermed undersøges oversvinget blot for hjørnerne (200mm,200mm) og (200mm,100mm). Sammenligningen kan ses på figur B.5.



Figur B.5: *Oversving på x-aksen.*



Figur B.6: *Oversving på y-aksen.*

På figur B.5 og figur B.6, ses plots hvor forsøget er gentaget 5 gange. Det ses på figur B.6 at forsøg nummer 5 afviger fra de resterende forsøg. Dette kan skyldes en målefejl.
Det ses på begge grafer, at oversvinget stiger lineært med inkrementer af 100 mm/min op til 1600 mm/min, hvorefter stigningen i oversvinget mindskes. Da systemet har hastigheden som måleparameter, og der reguleres ind efter positionen, er systemet et 2. orden system, og der skulle teoretisk ikke være en ligevægtsfejl. Ved undersøgelse af oversvinget, blev det observeret at efter indsvingning efter en hastighedsændring på både x- og y-aksen, var der en ligevægtsfejl på 0.04 mm på positionen. Det vurderes at det ikke vil være muligt at overholde tolerancen på $\pm$ 0.05 mm, ved de forsøgte hastigheder med den nuværende regulering.

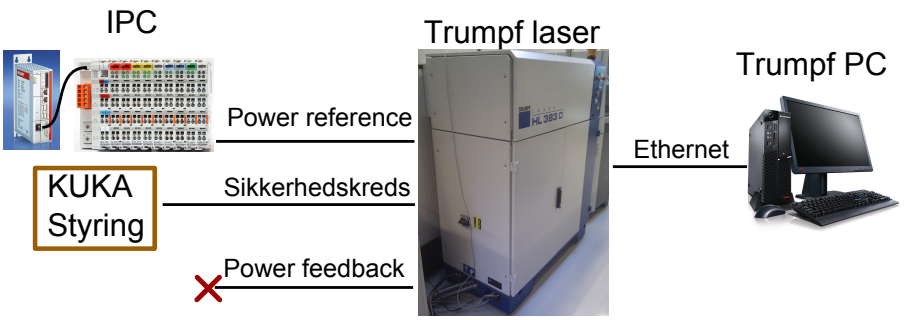
Tilslutning af laser

C

Ved projektstart var IPG laseren tilsluttet og fuldt funktionel. Trumpf laseren krævede tilslutning og yderligere reperation. Dette kapitel indeholder en beskrivelse af opsætningen, tilslutningen af Trumpf laseren samt kalibreringen IPG laseren.

C.1 Tilslutning

Trumpf laseren var kun delvist tilsluttet ved projektstart, dvs. der var trukket strøm, køling, og fiberen mellem laseren, og skærehovedet. Det var derfor nødvendigt at tilslutte Trumpf PC'en, power referencen og sikkerhedskredse, for at laseren kunne startes. Tilslutningen er foretaget iht. manualerne for Trumpf laseren, og visuelle inspektioner af signalkabler og indstikskort, som vist på figur C.1.



Figur C.1: *Styringskreds for Trumpf laser.*

Effektreferencen er et analogt signal, der varierer effekten af det valgte laserpulsprofil. Effektreferencen er det eneste signal der kan ændres under en skæring, og bruges derfor også til at slukke laseren, ved at sætte referencen til 0. Det er nødvendig at køre en række forsøg for at finde sammenhængenden mellem effektreferencen og effekten som Trumpf laseren leverer. Effektreferencen styres af I/O kortet, fra IPCen, da det derved er muligt at ændre styrken gennem g-koden.

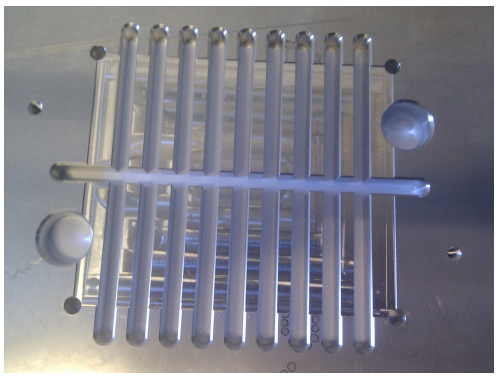
Sikkerhedskredsen er det eksterne nødstop, der vil stoppe laseren, hvis denne bliver afbrudt. Trumpf laserens sikkerhedskreds er forbundet med KUKA styringen, hvor alle nødstop i og omkring lasercellen er tilsluttet, alle nødstop vil derfor stoppe laseren.

Power feedback angiver laserens leverede effekt, hvor den skydes ud i fiberen.

Ethernet er et digitalt signalkabel, der forbinder Trumpf PC'en med Trumpf laseren. Trumpf PC'en styrer laseren, og ethernet forbindelsen, sender information om laserens status, f.eks. temperaturer, fejlmeddelelser, eller effekt. På Trumpf PC'en indstilles effektprofilen, og dette sendes derfor også til laseren over ethernet forbindelsen.

C.2 Opsætning

Da Trumpf laseren ikke har været anvendt i denne lasercelle før dette projekt, er det nødvendig at designe og fremstille et fikstur til fastspænding af arbejdsemner. Der tages udgangspunkt i en pladestørrelse på 100 mm x 120 mm da denne pladestørrelse allerede er blevet anvendt i anden sammenhæng med IPG laseren, og der findes derfor allerede et fikstur for denne. Det vurderes fra laserskæring i andet tyndpladematerialе med IPG laseren, at gastrykket kan deformere plader, der kun er understøttet i kanten, og det vil derfor være hensigtsmæssigt at designe et fikstur, med understøtning mellem skæringerne. Udover de eksperimentelle skæringer, vil det være hensigtsmæssigt hvis fiksturet vil kunne anvendes ved evt. udskæring af arbejdsemner, for videre bearbejdning og analyse. Ud fra ovenstående er fiksturet, set på figur C.2, blevet fremstillet. Arbejdstegninger for fiksturet kan ses på figur C.7.



Figur C.2: *Billede af fikstur.*

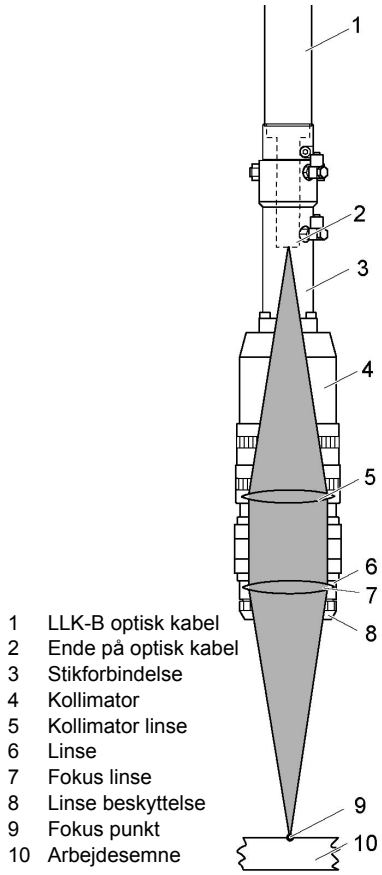
C.3 Laser kalibrering

Når fiksturet er sat op, kan laseren kalibreres. Det er valgt at fokusere på tre parametre for laseren; fokuspunkt i forhold til emnet, centrering af gasdyse og reel laser effekt. Centrering af gasdysen, er nødvendigt for at sikre at gasdysen ikke bliver ramt af laserstrålen. Centreringen af gasdysen, foretages ved hver udskiftning af dyse, og i tilfælde af kollisioner af dysen med objekter. Laserens fokuspunkt skal kendes, da afstanden fra fokuspunktet og emneoverfladen er en forsøgsparameter.

C.3.1 Fokuspunkt

For at bestemme afstanden fra linsens fokuspunkt, var det nødvendigt at køre en række testforsøg. Fokuslængden er afhængig af hvilken linse der anvendes, og er derpå også opgivet. Da linsen er placeret

inde i skærehovedet, er det svært at placere fokuspunktet relativt til arbejdsemnet, se figur C.3. Det var derfor nemmest finde fokuspunktet ved at udføre en række forsøg.

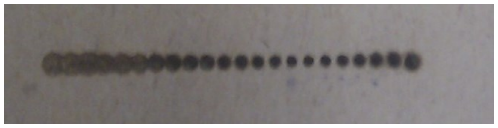


Figur C.3: *Illustation af linseplaceringer og fokuspunkt for skærehovedet.*

For at definere fokuslængden i forhold til arbejdsemnet, er det valgt at skyde i et brændbart materiale, også kaldet skærepap. Fordelen ved at anvende et brændbart materiale er, at materialet ikke deformerer men derimod forbrænder. Fokuspunktet kan derfor defineres ud fra arbejdsemnets overside, ved at undersøge hvor laseren laver det mindste indgangshul. Forsøget udføres på følgende måde:

1. Placer fokuslinsen i en afstand fra skærepappet der er længere end den foreskrevne fokuslængde.
2. Skær en prik i skærepappet med laseren.
3. Flyt fokuslinsen et inkrement tættere på arbejdsemnet.
4. Flyt laserhovedet et inkrement langs arbejdsemnet, for ikke at skære i samme område.
5. Gentag rutinen.

Fokuspunktet vil flytte sig ned mod arbejdsemnet, og dette vil kunne ses ved at indgangshullerne i arbejdsemnet vil blive mindre, indtil fokuspunktet er på oversiden af arbejdsemnet, og indgangshullerne udvider sige igen, i takt med at fokuspunktet flytter sig ned gennem arbejdsemnet. Indgangshullerne fra indskydning af IPG laseren kan ses på figur C.4, hvor afstanden fra fokuslinsen til arbejdsemnet, er minimeret i inkrementer af 2 mm.

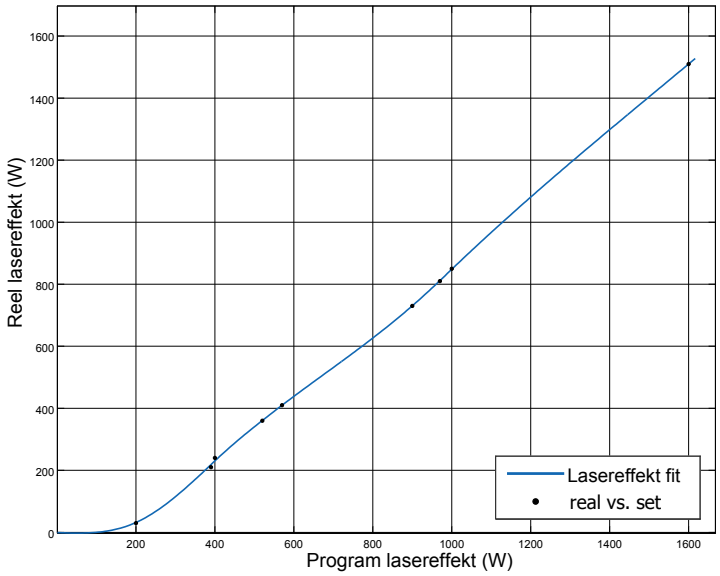


Figur C.4: *Indgangshuller i skærepap, fra søgning efter fokuspunkt.*

Fokuspunktet, kan findes ud fra det mindste indgangshul, og skærehovedets position kan noteres. I denne position er linsen placeret i fokus relativt til arbejdsemnets overflade.

C.3.2 Reel effekt

Da der er en forskel i den effekt man indstiller på PLC'en, og den der leveres af laseren, er det nødvendigt at bestemme en sammenhæng herimellem. Den effekt laseren indstilles til på PLC'en, og den effekt laseren leverer er forskellig, da signalet fra PLC'en er analogt. For at lave en signal omregning er effekten blevet noteret, for den indstillede og den leverede effekt. Indsamlingen af disse data er ikke blevet foretaget af projektgruppen, men er blevet anvendt til at opstille en sammenhæng mellem den reelle og den leverede effekt. Opsamlingen af data er foretaget ved tidligere brug af lasercellen. På figur C.5 ses en sammenhæng mellem den reelle effekt og den leverede effekt.



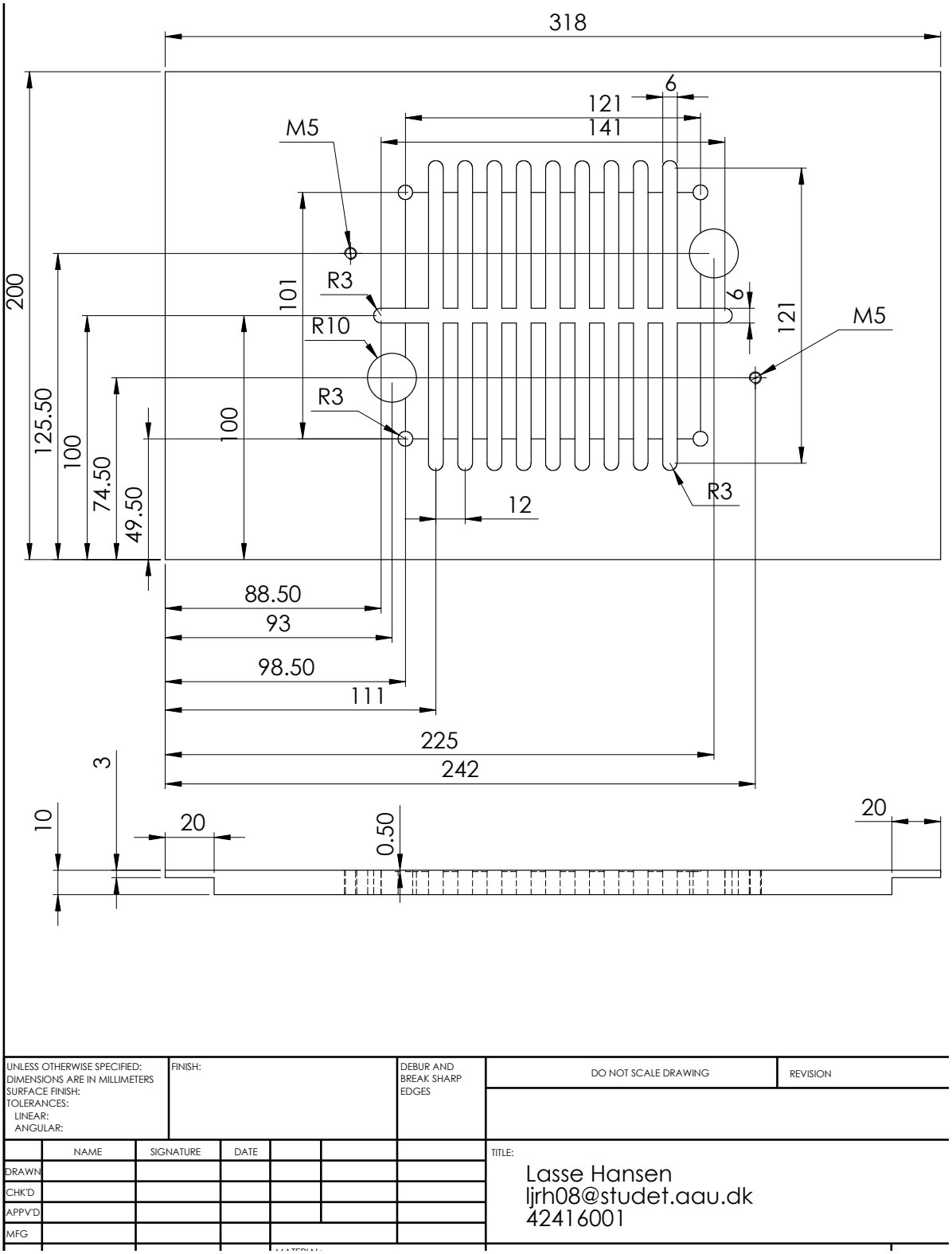
Figur C.5: *Sammenhængen mellem reel effekt og indstillet effekt.*

C.3.3 Gasdyse centrering

Gasdysen har tre indstillingsmuligheder, flytning i x-retningen, y-retningen og afstand til arbejdsemne. Gasdysens afstand til emnet er bestemt til 1 mm [Ghany og Newishy, 2005]. For indstillingen af denne afstand, anvendes et søgeblad på 1 mm, hvor laserhovedet flyttes ned mod emnet, til søgebladets bredde er opnået. For x- og y-retningen er det bestemt at centrere gasdysen og laserstrålen. Centreringen af laserstrålen og gasdysen, kan ikke opmåles direkte, derfor anvendes et stykke tape der monteres på dyseudmundingen, for herefter at gennembore tapen med laseren. Ved at markere dyseudmundingen med

en sprittusch, vil denne blive afmærket på tapen, og derved kan denne sammenholdes med hullet lavet af laseren. Et billede af tapen kan ses på figur C.6. Denne indstillingsmetode er iterativ, og derfor fortages en justering i x- og y-retningen, og derefter fortages en ny opmåling, processen gentages til en ønsket præcision er opnået.

Figur C.6: *Tape med gasdyse afmærkning, og hul fra laserstråle.*



Figur C.7: *Arbejdstegninger for fikstur.*

Anova

D

For at vurdere om procesparametrene har en indvirkning på måleparametrene, er det nødvendig at lave en variansanalyse. Der tages udgangspunkt i de målte værdier for måleparametre, der kan findes på den vedlagte DVD.

Udregningen af ANOVA tabellerne er foretaget vha. MATLAB, da MATLAB anvender samme fremgangsmåde som beskrevet i Design and Analysis of Experiments af Douglas C. Montgomery [Montgomery, 2013], vil denne fremgangsmetode blive beskrevet. Værdierne for måleparametrene til en bestemt skæring, vil blive refereret til som et eksperiment. Fremgangsmåden er som følger:

Udregn summen og gennemsnittet af alle kvalitetsparametre for alle eksperimenter.

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^{n} y_{ij} \qquad \overline{y}_{i.} = y_{i.}/n \tag{D.1}$$

$\overline{y_{i.}}$ er gennemsnittet af et eksperiment.
$y_{i.}$ er summen for alle kvalitetsparametre i et eksperiment.
a er antal eksperimenter.
n er antal kvalitetsparametre i et eksperiment.
y_{ij} er værdien af en kvalitetsparameter for et givet eksperiment.

Udregn summen og gennemsnittet for alle målinger i alle eksperimenter.

$$y_{..} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{n} y_{ij} \qquad \overline{y}_{..} = y_{..}/a \cdot n \tag{D.2}$$

Udregn den kvadrerede sum mellem eksperimenterne.

$$SS_{Mellem} = n \sum_{i=1}^{a} (\overline{y}_{i.} - \overline{y}_{..})^2 \tag{D.3}$$

Udregn den totale kvadrerede sum af alle eksperimenter.

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{n} (y_{ij} - \overline{y}_{..})^2 \tag{D.4}$$

Udregn afvigelsen mellem den kvadrerede sum af alle eksperimenter og den kvadrerede sum mellem eksperimenterne.

$$SS_{Afvigelse} = SS_{Total} - SS_{Mellem} \tag{D.5}$$

For at udregne gennemsnittet for afvigelsen og den kvadrerede sum mellem eksperimenterne, deles der med deres respektive frihedsgrader (DOF).

$$MS_{Mellem} = \frac{SS_{Mellem}}{a-1} \qquad MS_{Afvigelse} = \frac{SS_{Afvigelse}}{(a \cdot n) - a} \tag{D.6}$$

Når gennemsnitsværdierne for hver enkelt måleparametre kendes, kan F værdien udregnes, der anvendes til at aflæse på en F fordeling, om hypotesen holder. Der benyttes en F-fordeling på 5%.

$$F = \frac{MS_{Mellem}}{MS_{Afvigelse}} \tag{D.7}$$

Nedenfor ses ANOVA tabellerne for måleparametrene, fordelt på forsøg med puls effekt og med kontinuerlig effekt.

Skæg					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	1719	1	1719	0.35	0.5571
Gastryk	206494.2	2	103247.1	21.06	0
Effekt	1547.2	2	773.6	0.16	0.8546
Hastighed	17874.8	7	2553.5	0.52	0.8136
Fejl	201048.9	41	4903.6		
Total	578733.5	55			

Tabel D.1: *ANOVA tabel for skæg ved kontinuerlige effekt forsøg.*

Skærebredde top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	792.6	1	792.55	10.8	0.0021
Gastryk	61.2	2	30.6	0.42	0.6619
Effekt	2179	2	1089.52	14.84	0
Hastighed	4675.3	7	667.9	9.1	0
Fejl	3009.7	41	73.41		
Total	28497.5	55			

Tabel D.2: *ANOVA tabel for skærebredde top ved kontinuerlige effekt forsøg.*

D.1 Vekselvirkninger

Skærebredde bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	284.36	1	284.36	1.71	0.1983
Gastryk	7562.47	2	3781.23	22.73	0
Effekt	2951.4	2	1475.7	8.87	0.0006
Hastighed	1762.85	7	251.84	1.51	0.1897
Fejl	6820.16	41	166.35		
Total	40908.99	55			

Tabel D.3: *ANOVA tabel for skærebredde bund ved kontinuerlige effekt forsøg.*

Hjørnetolerance top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	560063.2	1	560063.2	4.2	0.0469
Gastryk	156421.9	2	78210.9	0.59	0.5611
Effekt	619470.2	2	309735.1	2.32	0.1109
Hastighed	745035.1	7	106433.6	0.8	0.5938
Fejl	5470817.8	41	133434.6		
Total	8378823.4	55			

Tabel D.4: *ANOVA tabel for hjørnetolerance top ved kontinuerlige effekt forsøg.*

Hjørnetolerance bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	349867.1	1	349867.1	1.01	0.3204
Gastryk	11899021.5	2	5949510.8	17.2	0
Effekt	628336.4	2	314168.2	0.91	0.4112
Hastighed	6987785.9	7	998255.1	2.89	0.0151
Fejl	14181055.9	41	345879.4		
Total	37367296.7	55			

Tabel D.5: *5*

Vinkelrethed					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Dysediameter	0	0	0	0	NaN
Fokuspunkt	2.51	1	2.513	0.03	0.8726
Gastryk	178.29	2	89.144	0.92	0.4053
Effekt	286.42	2	143.209	1.48	0.2388
Hastighed	230.23	7	32.89	0.34	0.9304
Fejl	3958.6	41	96.551		
Total	5544.01	55			

Tabel D.6: *ANOVA tabel for vinkelrethed ved kontinuerlig effekt forsøg.*

Skæg					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	4049.6	2	2024.81	2.39	0.1028
Pulspause	5330.1	1	5330.13	6.28	0.0156
Effekt	3112	2	1555.99	1.83	0.1708
Hastighed	19844.4	6	3307.41	3.9	0.003
Fejl	40730.9	48	848.56		
Total	65567.5	59			

Tabel D.7: *ANOVA tabel for skæg ved puls effekt forsøg.*

Skærebredde top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	685.58	2	342.79	19.3	0
Pulspause	135.23	1	135.23	7.61	0.0082
Effekt	3516.37	2	1758.18	98.99	0
Hastighed	1972.79	6	328.8	18.51	0
Fejl	852.52	48	17.76		
Total	5697.25	59			

Tabel D.8: *ANOVA tabel for skærebredde top ved puls effekt forsøg.*

Skærebredde bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	820.61	2	410.31	9.1	0.0004
Pulspause	430.87	1	430.87	9.56	0.0033
Effekt	4445.18	2	2222.59	49.3	0
Hastighed	3138.73	6	523.12	11.6	0
Fejl	2164.11	48	45.09		
Total	9323.6	59			

Tabel D.9: *ANOVA tabel for Skærebredde bund ved puls effekt forsøg.*

Hjørnetolerance top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	902654	2	451327	3.37	0.0429
Pulspause	117407	1	117407	0.88	0.3541
Effekt	127457	2	63728.5	0.48	0.6246
Hastighed	395056.7	6	65842.8	0.49	0.8118
Fejl	6436134.8	48	134086.1		
Total	8057048.1	59			

Tabel D.10: *ANOVA tabel for hjørnetolerance top ved puls effekt forsøg.*

Hjørnetolerance bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	631907.6	2	315953.8	1.21	0.3067
Pulspause	100676.5	1	100676.5	0.39	0.5373
Effekt	3318017.5	2	1659008.7	6.36	0.0035
Hastighed	1363899.5	6	227316.6	0.87	0.5227
Fejl	12517873	48	260789		
Total	17223630.3	59			

Tabel D.11: *ANOVA tabel for hjørnetolerance bund ved puls effekt forsøg.*

Vinkelrethed					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid	220.3	2	110.152	1.56	0.2209
Pulspause	5.28	1	5.275	0.07	0.7859
Effekt	70.64	2	35.322	0.5	0.6098
Hastighed	366.54	6	61.09	0.86	0.5278
Fejl	3392.29	48	70.673		
Total	4028.56	59			

Tabel D.12: *ANOVA tabel for vinkelrethed ved puls effekt forsøg.*

Skæg					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	449.9	1	449.93	0.37	0.5532
Pulstid*Effekt	952	4	237.99	0.19	0.9384
Pulstid*Hastighed	3645.5	8	455.69	0.37	0.922
Pulspause*Effekt	838.2	2	419.1	0.34	0.7159
Pulspause*Hastighed	1783.1	5	356.62	0.29	0.9119
Effekt*Hastighed	11762.3	10	1176.23	0.96	0.5111
Fejl	20902.7	17	1229.57		
Total	65567.5	59			

Tabel D.13: *ANOVA vekselvirkningstabel for skæg ved puls effekt forsøg.*

Skærebredde top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	38.49	1	38.487	3.26	0.0889
Pulstid*Effekt	128.26	4	32.066	2.71	0.0649
Pulstid*Hastighed	111.32	8	13.915	1.18	0.3670
Pulspause*Effekt	2.86	2	1.431	0.12	0.8867
Pulspause*Hastighed	40.74	5	8.148	0.69	0.6382
Effekt*Hastighed	72.8	10	7.28	0.62	0.7804
Fejl	200.92	17	11.819		
Total	5697.25	59			

Tabel D.14: *ANOVA vekselvirkningstabel for skærebredden top ved puls effekt forsøg.*

Skærebredde bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	49.55	1	49.55	4.4	0.0513
Pulstid*Effekt	228.35	4	57.089	5.07	0.0071
Pulstid*Hastighed	410.1	8	51.262	4.55	0.0042
Pulspause*Effekt	24.29	2	12.146	1.08	0.3625
Pulspause*Hastighed	283.02	5	56.605	5.02	0.0052
Effekt*Hastighed	277.47	10	27.747	2.46	0.0491
Fejl	191.59	17	11.27		
Total	9323.6	59			

Tabel D.15: *ANOVA vekselvirkningstabel for skærebredden bund ved puls effekt forsøg.*

Hjørnetolerance top					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	163674.1	1	163674.1	1.66	0.2149
Pulstid*Effekt	1774963.3	4	443740.8	4.5	0.0116
Pulstid*Hastighed	637937.8	8	79742.2	0.81	0.6044
Pulspause*Effekt	50461.6	2	25230.8	0.26	0.7772
Pulspause*Hastighed	162696.8	5	32539.4	0.33	0.8879
Effekt*Hastighed	820937.3	10	82093.7	0.83	0.6053
Fejl	1676250.6	17	98603		
Total	8057048.1	59			

Tabel D.16: *ANOVA vekselvirkningstabel for hjørnetolerance top ved puls effekt forsøg.*

Hjørnetolerance bund					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	2313.2	1	2313.2	0.01	0.9087
Pulstid*Effekt	1561196.1	4	390299	2.29	0.1023
Pulstid*Hastighed	2043291.5	8	255411.4	1.5	0.2301
Pulspause*Effekt	262840.2	2	131420.1	0.77	0.4785
Pulspause*Hastighed	813346.3	5	162669.3	0.95	0.4729
Effekt*Hastighed	2437847.2	10	243784.7	1.43	0.2489
Fejl	2901448.1	17	170673.4		
Total	17223630.3	59			

Tabel D.17: *ANOVA vekselvirkningstabel for hjørnetolerance bund ved puls effekt forsøg.*

Vinkelrethed					
Procesparameter	Kvadr. sum	DOF	Kvadr. gns.	F	Sandsynlighed>F
Pulstid*Pulspause	113.84	1	113.841	2.06	0.1689
Pulstid*Effekt	283.53	4	70.881	1.29	0.3147
Pulstid*Hastighed	559.07	8	69.884	1.27	0.3224
Pulspause*Effekt	61.39	2	30.693	0.56	0.5833
Pulspause*Hastighed	404.37	5	80.875	1.47	0.2521
Effekt*Hastighed	800.65	10	80.065	1.45	0.2398
Fejl	937.56	17	55.15		
Total	4028.56	59			

Tabel D.18: *ANOVA vekselvirkningstabel for vinkelrethed ved puls effekt forsøg.*

Billedeanalyse

E

Dette bilag indeholder en beskrivelse af analyseprocessen af de skårne og forarbejdede emner. Når billederne af de givne emner er fremstillet, skal disse analyseres for at undersøge de givne kvalitetsparametre fra kapitel 4.

Følgende krav er opstillet for opmålingen af kvalitetsparametrene:
Simple for brugeren. For at minimere risikoen for menneskelige fejl, skal målemetoderne være så simple at anvende som muligt.
Systematisk målemetode. For at skabe klarhed, er en systematisk tilgang nødvendig. **Replikerbar** For at belyse evt. uklare måleresulater, er det vigtigt at være i stand til at af foretage replikationer af målingerne.
Minimering af relativ måleusikkerhed. Den relative måleusikkerhed er vigtig, da en model af skæreprocessen vil afhænge af de indsamlede empiriske data.

For at opfylde disse krav, er det bestemt at fremstille en automatisk målemetode. Fordelen ved at anvende en automatisk målemetode er, at spredningen af måleresultaterne vil være mindre, dog kan en evt. fejl i målemetoden give en forskydning af gennemsnittet for målingerne. Ved en manuel målemetode vil risikoen for fejlmålinger være større. En automatisk målemetode vil være tidskrævende at opstille, dog vil dette være relativt kort tid i forhold til antallet målinger der skal udføres i dette projekt.

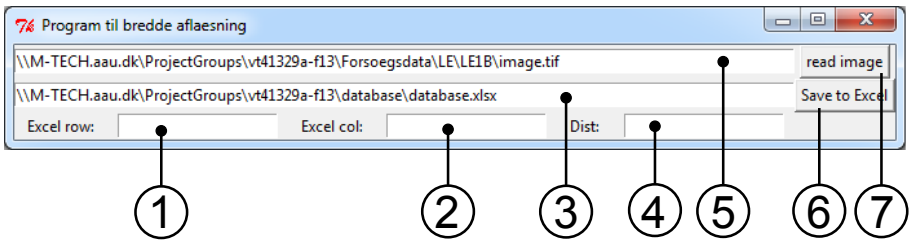
Det er bestemt at fremstille to programmer til at automatisere billedeanalysen, et der kan måle skærebredden ved top og bund, og et program der kan måle resten af kvalitetsparametrene på tværsnitsbilledet, med undtagelse af skæg.

E.1 Skærebreddeopmålingsprogram

Det er valgt at anvende Python som programmeringssprog, da dette er godt til at håndtere arrays, og derved også billedbehandling. Skærebreddeopmålingsprogrammet kan opdeles i 3 funktioner; brugerflade, skærebreddeopmåling, og placering af data i databasen.

E.1.1 Brugerflade

Brugerfladen er bygget vha. biblioteket TkInter der er pythons eget brugerflade bibliotek.



Figur E.1: *Brugerflade for Skærebreddeopmålingsprogram.*

1. Viser hvilken databaserække målingen skrives i.
2. Viser hvilken databasesøjle målingen skrives i.
3. Sti for den ønskede datafil.
4. Viser den målte gennemsnitsbredde for skæringen i *mm*.
5. Sti for det ønskede billede.
6. Eksekverer funktionen der placerer data i databasen.
7. Eksekverer funktionen der opmåler skærebredden.

Brugerfladen anvendes ved først, at definere de to stier til hhv. billeder og database. Det er valgt at holde disse stier så simple så muligt, da det ofte kun er en karakter i stien der er forskellig fra billede til billede. Når stierne er valgt, kan knappen Şread imageŤ anvendes, og bredden vil blive beregnet og skrevet ud, samt række og søjle for databaseplaseringen. Knappen Şsave to excelŤ skriver skærebredden til databasen og sletter de gamle data fra programmet, så programmet er klart til næste billede.

E.1.2 Skærebreddeopmåling

For at foretage en analyse og manipulation af billederne, er biblioteket OpenCV anvendt. Fordelen ved at anvende OpenCV er en nem anvendelse af funktioner, og disse funktioner er implementeret i C kode for at optimere hastigheden. Fremgangsmåden til opmåling af skærebredden kan ses i pseudokode på figur E.2.

```
FUNCTION ImageDist()

    //Indlæs billede
    billede = Indlæs RGB billede
    Gråbillede = Konverter billedet til gråtoner
    Binbillede = Konverter Gråbillede til binært billede

    Højde = Find højden af billedet
    Bredde = Find bredden af billledet
    MatrixVenstreKantSkæring = Matrix til lagring af venstre kants pixel koordinater
    MatrixHøjreKantSkæring = Matrix til lagring af højre kants pixel koordinater

    //Billedets koordinatsystem er placeret i øverste venstre hjørne med z aksen ...
        pegende ud af billedet
```

```
//Loop gennem billedet, for at finde pixel koordinater for den venstre og højre ...
    kant af skæringen
y = Bredde/4  // Start en fjerdedel inde i billedets bredde
x = 0                       // Søg efter kanterne i hele billedets højde
MidlertidigVenstreKantKoordinat = 0       // Midlertidig koordinat lagring
MidlertidigHøjreKantKoordinat = 0         // Midlertidig koordinat lagring
WHILE x < Højde
    WHILE y < Bredde*3/4 // Slut 3/4 inden i billedet
        PixelVærdi = Pixelværdi for de givne x,y koordinater i det binære billede
        IF PixelVærdi > 0
            IF MidlertidigVenstreKantKoordinat = 0
                MidlertidigVenstreKantKoordinat = y
            ELSE
                MidlertidigHøjreKantKoordinat = y
            END IF
        END IF
        y = y + 1
    END WHILE
    y = 0
    x = x + 1
    MatrixVenstreKantSkæring = MidlertidigVenstreKantKoordinat og x
    MatrixHøjreKantSkæring = MidlertidigHøjreKantKoordinat og x
    MidlertidigVenstreKantKoordinat = 0
    MidlertidigHøjreKantKoordinat = 0
END WHILE
x = 0

//Fit 2 lineære funktioner til venstre og højre skærekant
FUNCTION LinearLeastSquare(input=MatrixVenstreKantSkæring)
    Fit y=a*x+b til inputmatrix vha. linear least square,
    hvor y og x er inputmatricer
    RETURN (a og b)
END FUNCTION
FUNCTION LinearLeastSquare(input=MatrixHøjreKantSkæring)
    Fit y=a*x+b til input matrix vha. linear least square,
    hvor y og x er input matrix
    RETURN (a og b)
END FUNCTION

//Bestem den minimale og maksimale afstand mellem de lineære funktioner
MaksAfstandMellemLinjer = Bestem den maksimale afstand mellem linjerne på billedet
MinAfstandMellemLinjer = Bestem den mindste afstand mellem linjerne på billedet
```

```
    //Bestem gennemsnitsbredden af skæringen
    GennemsitligAfstandMellemLinjer = (MaksAfstandMellemLinjer - ...
        MinAfstandMellemLinjer)/2

    //Omregn skærebredden til mm fra pixels
    pixelTilmilimeter = Omregningsfaktor fra pixel til milimeter
    GennemsitligSnitBredde = GennemsitligAfstandMellemLinjer *pixelTilmilimeter

    RETURN GennemsitligAfstandMellemLinjer
END FUNCTION
```

Figur E.2: *Funktion til at bestemme bredden af snittet*

Fremgangsmåde på figur E.2 viser en pixelbaseret fremgangsmåde, hvor de to kanter af skæringen først findes vha. at en analyse af pixelværdierne for billedet. Ved at andevende denne metode, anvendes en metode der en meget specialiseret metode, hvor der er sættes store krav til inputbillederne, da ændringer af synsvinkel, billedparametre, generelle ændringer i omgivelserne omkring fremstilling af billedet, vil kunne forsage fejl i målemetoden. I dette projekt foregår fremstillingen af billederne under kontrollerede forhold. Hvis det ikke var muligt at fastholde billedes fremstillingsparametre vil det være nødvendig med mere avancerede billedeanalysemetoder som f.eks. featurebaseret billedeanalyse, hvor der opstilles en model baseret på billeder, og nye billede skal fremover sammenlignes med modellen.

E.1.3 Placering af data i database

Da det er valgt at bruge Excel til databasestyring, er det nødvendigt at kunne skrive den fundne skærebredde til en fil i Excel format. For at skrive til en Excel fil, anvendes biblioteket OpenPyXL. Når skærebredden er fundet skal det bestemmes hvor i databasen denne skal noteres, dette sker ved undersøgelse af stigen for billedet, da denne er noteret på følgende måde:

..\Foregsdata \LE \LE1B \image0002.tif

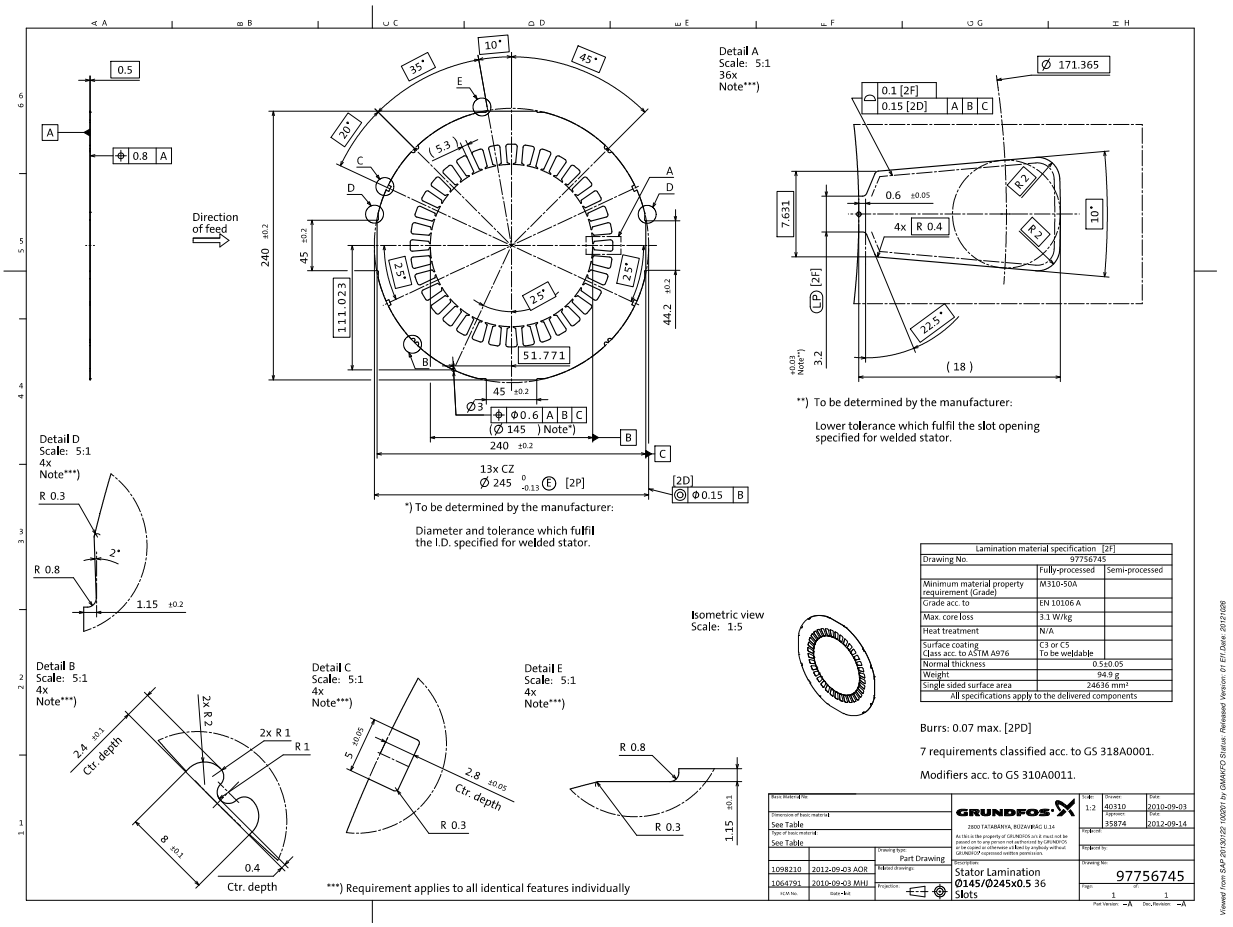
Hvor navnet på billedet indikerer hvilken skæring der er taget et billede af på pladen. Navngivningen er foretaget på følgende måde:
Skæring 1: image.tif
Skæring 2: image0001.tif
Skæring 3: image0002.tif
Den sidste mappe, definerer hvilket pladenummer det er og om billedet er af toppen eller bunden:
Plade 1, vinkel top skæring: LE1T
Plade 1, vinkel bund skæring: LE1B
Plade 2, vinkel top skæring: LE2T

Ved automatisk generering af databaseplaceringen ud fra billedestien, minimeres risikoen for aflæsnings og indtastningsfejl. Når databaseplaceringen er kendt, åbnes Excelfilen, målingen noteres og excelfilen lukkes afslutningsvis.

Programmet til opmåling af de resterende geometriske mål, er konstrueret på samme måde som programmet til opmåling af skærebredden, og vil derfor ikke blive gennemgået. Begge programmer kan findes på bilags dvden G.

Arbejdstegning for stator

F



Figur F.1: *Arbejdstegning af stator fra Grundfos pumpe.*

DVD index

G

Filer kan findes på følgene stiger på den ved lagte DVD

Python program til måling af kvalitetsparametre fra tværsnit af skæring:
DVD\Programmer\tvaersnitmaaling\readimage.py

Imagej anvendt til måling af skæg:
DVD\Programmer\maalingafskaeg\ImageJ.exe

Python program til måling af skærebredden:
DVD\Programmer\Breddemaaling\distRead.py

Excel fil indeholdende procesparametre, og tilhørene kvalitetsparametre:
DVD\Database\database.xlsx

Datablad for en akse, for XY-bordet:
DVD\Datablade\XYbord\XY.pdf

G-kode til skæring af forsøg:
DVD\Gkode\EmilLasseCut.NC

Rapport i pdf format:
DVD\Rapport\Rapport.pdf