

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Automatisatie micro Vickers hardheidsmeter

Seppe Schoefs

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Johan BAETEN

PROMOTOR :

dr. ir. Stijn CLUSTERS

Gezamenlijke opleiding UHasselt en KU Leuven



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen | Agoralaan Gebouw H - Gebouw B | BE 3590 Diepenbeek

Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE 3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE 3500 Hasselt



2023
2024

Faculteit Industriële Ingenieurswetenschappen

master in de industriële wetenschappen:
elektromechanica

Masterthesis

Automatisatie micro Vickers hardheidsmeter

Seppe Schoefs

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: elektromechanica

PROMOTOR :

Prof. dr. ir. Johan BAETEN

PROMOTOR :

dr. ir. Stijn CLIJSTERS



KU LEUVEN

Woord vooraf

Ter behalen van het masterdiploma industriële ingenieurswetenschappen wordt een masterproef uitgevoerd in samenwerking met een onderneming of onderzoeksinstelling. De onderneming waarmee samengewerkt wordt is Laser Cladding Venture (LCV) te Oudsbergen. Hun voorgestelde masterproef richt zich op de automatisatie van een micro-Vickers-hardheidsmeter om het analyseren van materiaaleigenschappen te versnellen.

Persoonlijk sprak deze masterproef mij meteen aan. Het is een praktische proef waarvan het resultaat ook effectief zal worden gebruikt. Het onderwerp omvat verschillende aspecten die mij interesseren, waaronder elektronische sturingen, mechanisch ontwerp, computervisie en materiaalkunde. De kennis die ik de afgelopen jaren heb verworven, kon hier uitvoerig op worden toegepast.

Graag spreek ik mijn dank uit aan degenen die mij hebben bijgestaan en begeleid tijdens deze masterproef. Ten eerste bedank ik graag mijn externe promotor, de heer Stijn Clijsters (LCV) voor het mogelijk maken van deze masterproef. Hij was steeds bereid mij bij te staan en heeft mij altijd met enthousiasme geholpen. Graag bedank ik ook mijn interne promotor, de heer Johan Baeten (UHasselt/KU Leuven). Hij volgde het verloop van mijn masterproef op, had altijd nuttig advies en was steeds bereid vragen te beantwoorden. Ook bedank ik graag de heer Jeroen Lievens (UHasselt/KU Leuven) voor het taaladvies tijdens het schrijven van deze scriptie.

Verder bedank ik graag iedereen bij LCV voor de aangename sfeer. Ik voelde mij vanaf de eerste dag meteen welkom en was dan ook vereerd uitgenodigd te worden voor de verschillende activiteiten buiten het werk. Tot slot bedank ik natuurlijk mijn familie en vrienden voor hun steun gedurende deze masterproef en de afgelopen jaren.

Zonder de hierboven vermelde personen zou deze masterproef niet mogelijk zijn geweest. Het behaalde resultaat is mede dankzij hun.

Inhoudsopgave

| | |
|---|-----------|
| Woord vooraf..... | 1 |
| Lijst van tabellen | 5 |
| Lijst van figuren | 7 |
| Verklarende woordenlijst | 9 |
| Abstract | 11 |
| Abstract in English..... | 13 |
| 1 Inleiding..... | 15 |
| 1.1 Situering..... | 15 |
| 1.2 Probleemstelling | 16 |
| 1.3 Doelstellingen | 16 |
| 1.4 Methode | 17 |
| 1.5 Vooruitblik..... | 18 |
| 2 Literatuurstudie..... | 19 |
| 2.1 Laser Cladding | 19 |
| 2.1.1 Wat is laser cladding..... | 19 |
| 2.1.2 Het proces | 19 |
| 2.1.3 Toepassingen | 20 |
| 2.1.4 Materiaaleigenschappen | 20 |
| 2.2 Vickers-hardheidsmeting | 21 |
| 2.2.1 Inleiding..... | 21 |
| 2.2.2 De Vickers-hardheidsmeting | 21 |
| 2.2.3 Meetprincipe..... | 21 |
| 2.2.4 Meetresultaat | 22 |
| 2.3 Vickers-hardheidsmeting met computervisie..... | 23 |
| 2.3.1 Waarom computervisie..... | 23 |
| 2.3.2 Problemen met computervisie | 23 |
| 2.3.3 Oplossingen | 24 |
| 2.3.4 Conclusie | 24 |
| 3 Materiaal en methode..... | 25 |
| 3.1 Inleiding | 25 |
| 3.2 LabVIEW | 25 |
| 3.3 Arduino | 25 |
| 3.4 Adafruit Motor Shield..... | 26 |
| 3.5 Hardheidsmeter | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.6 | XY-tafel | 28 |
| 3.7 | Camera | 28 |
| 3.8 | Opstelling | 28 |
| 4 | Uitwerking | 29 |
| 4.1 | Inleiding | 29 |
| 4.2 | XY-tafel | 29 |
| 4.2.1 | Werking | 29 |
| 4.2.2 | Programmatie..... | 29 |
| 4.2.3 | Resultaat | 32 |
| 4.3 | Automatisatie hardheidsmeter..... | 33 |
| 4.4 | Hardheidsmeting met computervisie | 34 |
| 4.4.1 | Opstelling..... | 34 |
| 4.4.2 | Meetmethodes..... | 35 |
| 4.4.3 | Ontwikkeling visieprogramma | 38 |
| 4.4.4 | Integratie in LabVIEW | 41 |
| 4.4.5 | Meetproces..... | 42 |
| 4.4.6 | Resultaat | 43 |
| 5 | Resultaten | 45 |
| 5.1 | Gebruikersinterface..... | 45 |
| 5.1.1 | General controls and status..... | 45 |
| 5.1.2 | Jog controls..... | 46 |
| 5.1.3 | Grid controls..... | 47 |
| 5.1.4 | Indentation progress | 48 |
| 5.1.5 | Diagonal indentation..... | 48 |
| 5.1.6 | Rapportering..... | 49 |
| 5.2 | Besturingensmodule..... | 49 |
| 5.3 | Resultaten visieprogramma..... | 51 |
| 5.3.1 | Meetfout..... | 51 |
| 5.3.2 | Gekalibreerde meting | 51 |
| 6 | Besluit | 53 |
| | Referentielijst..... | 55 |
| | Bijlagen..... | 57 |

Lijst van tabellen

| | |
|--|----|
| Tabel 1: Bewegingen en acties van de geautomatiseerde hardheidsmeter | 31 |
| Tabel 2: Resultaten objectanalyse | 42 |
| Tabel 3: Voorbeeld van resultatenrapportering | 49 |
| Tabel 4: Resultaten gekalibreerde meting | 51 |

Lijst van figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1: Laser cladding proces [11, p.2]..... | 19 |
| Figuur 2: Vickers-indentatie foto | 22 |
| Figuur 3: Vickers-indentatie [7, p. 161] | 22 |
| Figuur 4: Slechte uitlijning camera t.o.v. indenter | 23 |
| Figuur 5: Vervuiling van te meten indentatie en ongelijke verlichting | 23 |
| Figuur 6: Arduino Uno | 26 |
| Figuur 7: Adafruit Motor Shield..... | 26 |
| Figuur 8: Wilson-Wolpert Tukon 2100B hardheidsmeter..... | 27 |
| Figuur 9: Schematische weergaven van de opstelling..... | 28 |
| Figuur 10: Opbouw communicatieprotocol..... | 30 |
| Figuur 11: Opstelling camera | 34 |
| Figuur 12: Geslaagde Rake-meting..... | 35 |
| Figuur 13: Foutieve Rake-meting..... | 35 |
| Figuur 14: Grijswaarde (A) vs. Binair (B) | 36 |
| Figuur 15: Te lage (A) vs. te hoge (B) threshold | 36 |
| Figuur 16: Correcte threshold..... | 37 |
| Figuur 17: Origineel kleurenbeeld..... | 38 |
| Figuur 18: Grijswaardenbeeld | 38 |
| Figuur 19: Kalibratieplaat | 39 |
| Figuur 20: Beeld na toepassing threshold | 39 |
| Figuur 21: Sectie voor uitmiddeling..... | 40 |
| Figuur 22: Sectie na uitmiddeling | 40 |
| Figuur 23: Resultaat na verwijderen van kleine objecten en randen | 40 |
| Figuur 24: Resultaat van de beeldbewerking | 41 |
| Figuur 25: Grafische gebruikersinterface | 45 |
| Figuur 26: General controls and status..... | 46 |
| Figuur 27: Jog controles | 46 |
| Figuur 28: Grid controls | 48 |
| Figuur 29: Indentation progress bar | 48 |
| Figuur 30: Diagonal indentation..... | 48 |
| Figuur 31: Finale besturingseenheid | 49 |
| Figuur 32: Bedradingschema besturingsmodule..... | 50 |
| Figuur 33: Resultaten gekalibreerde meting..... | 52 |

Verklarende woordenlijst

| | |
|---------------------------|---|
| <i>auxiliary</i> | Een hulpstuk of extra eigenschap van een toestel |
| CAD/CAM | CAD/CAM staat voor Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing. Het is een geïntegreerd systeem van softwaretools die gebruikt worden voor zowel het ontwerpen (CAD) als het produceren (CAM) van producten. |
| CSV | Afkorting voor comma-separated values, een tabellenbestand waarin de verschillende rijen en kolommen worden gescheiden door een scheidingsteken zoals een komma. |
| <i>opensource</i> | De gebruiker heeft de licentie om de broncode te bestuderen, eventueel aan te passen en te verspreiden. |
| PCB | PCB staat voor printed circuit board en is een printplaat waarop verschillende elektronische componenten worden gemonteerd en via banen met elkaar verbonden. Deze banen zorgen voor een zeer compacte schakeling van de gemonteerde componenten. |
| <i>Region of interest</i> | De region of interest is een afgebakende zone in een beeld waarop de beeldverwerking zal worden toegepast. Meestal wordt deze zone door de gebruiker gedefinieerd maar kan ook softwarematig worden ingesteld. |
| TTL | TTL staat voor "Transistor-Transistor Logic" en verwijst naar een logische schakeltechniek die gebruik maakt van transistoren om digitale signalen te verwerken. |
| <i>turret</i> | Roterend mechanisme waarop verschillende gereedschappen worden geplaatst. Deze biedt de mogelijkheid automatisch van gereedschap te wisselen zonder menselijke interactie. |

Abstract

Laser Cladding Venture (LCV) te Oudsbergen is gespecialiseerd in *laser cladding*, een laserlasproces voor het aanbrengen van coatingmaterialen of het 3D-printen van metalen.

Het lasproces doet een *heat affected zone* ontstaan in het substraat waarvan de eigenschappen variëren ten opzichte van het niet-beïnvloede substraatmateriaal. Een zorgvuldige analyse van de verschillende materiaallagen, door het uitvoeren van tientallen tot wel honderden Vickers-hardheidsmetingen, is daarom noodzakelijk.

Deze thesis beoogt de automatisatie van de micro-Vickers-hardheidsmeter die zorgt voor deze materiaalanalyse. De hardheidsmeter dient herhaaldelijk en nauwkeurig deze hardheidsmetingen uit te voeren zonder tussenkomst van een operator.

Voor deze automatisatie wordt een besturingssysteem ontwikkeld op basis van LabVIEW en Arduino. Dit systeem bestuurt de diverse componenten en verwerkt de verkregen data. Een XY-tafel wordt geïmplementeerd voor het verplaatsen van het proefstuk. Een interface met de hardheidsmeter maakt het mogelijk de nodige functies aan te spreken terwijl een computervisiesysteem het meten van de gemaakte indentatie automatiseert. De componenten worden afzonderlijk geïmplementeerd en vervolgens geïntegreerd.

Na uitvoering van deze thesis beschikt LCV over een geautomatiseerde en gebruiksvriendelijke hardheidsmeter. Door deze automatisering zal de tijd voor het maken en meten van een 50-tal indentaties tot 70% worden gereduceerd. Ook blijft de operator beschikbaar voor het uitvoeren van andere taken gedurende het proces.

Abstract in English

Laser Cladding Venture (LCV) in Oudsbergen specialises in laser cladding, a laser welding process for applying coating materials or 3D printing metals.

The welding process creates a heat affected zone in the substrate whose properties vary compared to the unaffected substrate material. A careful analysis of the different material layers, by performing tens to hundreds of Vickers-hardness measurements, is therefore necessary.

This thesis aims to automate the micro-Vickers-hardness tester that supports this material analysis. The hardness tester should repeatedly and accurately perform these hardness measurements without operator intervention.

A control system based on LabVIEW and Arduino is being developed for this automation. This system controls the various components and processes the obtained data. An XY-stage is implemented for moving the specimen. A connection with the hardness tester allows the LabVIEW program to address its necessary functions while a computer vision system automates the measurement of the made indentations. These components are developed separately and later integrated in to one system.

After carrying out this thesis, LCV will have an automated and user-friendly hardness tester. The automation reduces the time for making and measuring about 50 indentations by up to 70%. Also, the operator will be available to perform other tasks during the process.

1 Inleiding

1.1 Situering

Deze masterproef wordt gerealiseerd in samenwerking met Laser Cladding Venture (LCV), gevestigd in Oudsbergen en deel van de SKF-groep. LCV specialiseert zich in diverse toepassingen van *laser cladding*, waaronder preventieve slijtagebescherming, herstellingen van werkstukken en het 3D-printen van metalen. Omdat innovatie centraal staat binnen LCV, streeft het voortdurend naar optimalisatie van het laser cladding proces[1].

Laser cladding is een lasproces waarbij een coatingmateriaal onder poeder- of draadvorm wordt aangebracht op een onderliggend substraat. Dit materiaal wordt door de laser verwarmd en smelt op het oppervlak van het te behandelen werkstuk. Bij het afkoelen van het coatingmateriaal vormt zich een slijtvaste laag zonder poriën of scheuren die metallurgisch gebonden is aan het onderliggende werkstuk [2].

Het testen en valideren van de aangebrachte coating is van vitaal belang. LCV maakt voor dit proces gebruik van destructieve testen die vervolgens worden geanalyseerd door microscopen en gestandaardiseerde hardheidstesten op basis van ISO-normen[3]. LCV koos hiervoor de Vickers-hardheidstest vanwege zijn toepasbaarheid op een breed scala materialen.

Destructieve testen worden uitgevoerd op een proefstuk. Via dit proefstuk wordt het lasproces gevalideerd en de materiaalhardheid bepaald. Dit verzekert dat het coatingmateriaal de verwachte eigenschappen bezit wanneer het op een werkstuk wordt aangebracht.

Met behulp van een microscoop worden de verschillende lagen in het werkstuk en de coating geïnspecteerd, met specifieke aandacht voor een gelijkmatige aanbrenging met consistente poriëgrootte zonder verontreinigingen of eventuele scheurtjes. In combinatie met de Vickers-hardheidstest kan worden bevestigd of de aangebrachte coating daadwerkelijk de vereiste hardheid en metallurgische eigenschappen bezit.

Bepalen van de hardheid van een materiaal, gebruikmakende van de Vickers-hardheidstest, gebeurt op basis van een gestandaardiseerde indentatieprocedure. Hierbij wordt een indenter met de vorm van een omgekeerde piramide met een welbepaalde kracht over een periode van drie tot acht seconden in het materiaal aangebracht en vervolgens gedurende de zogenaamde *dwel-time* in stand gehouden. Na afloop van de *dwel-time* wordt de indenter uit het materiaal verwijderd. De afmeting van de resulterende indentatie dient als maatstaf voor de Vickers-hardheid[3]

1.2 Probleemstelling

Het nauwkeurig bepalen van de metallurgische eigenschappen en materiaalhardheid is voor LCV van cruciaal belang. Het stelt hun in staat de kwaliteit en eigenschappen van de bewerkte producten te controleren en te valideren. Om deze eigenschappen te bepalen worden op een proefstuk meerdere Vickers-hardheidsmetingen uitgevoerd, vaak tientallen of zelfs honderden metingen verspreid over het te analyseren gebied.

Voor dit meetproces maakt LCV gebruik van een hardheidsmeter. Deze zal het te meten materiaal voorzien van een indentatie, welke nadien door een operator kan worden gemeten met de ingebouwde microscoop. Wanneer dit proces herhaaldelijk wordt uitgevoerd, vergt dit een aanzienlijke tijd aangezien één volledige meting ongeveer twee minuten in beslag neemt. De software en sturing die zorgde voor de automatisatie van dit meetproces is verouderd, niet langer bruikbaar en wordt niet meer ondersteund door de leverancier van het toestel.

1.3 Doelstellingen

Het hoofddoel van deze masterproef betreft het automatiseren van de micro-Vickers-hardheidsmeter. Het toestel moet in staat zijn meerdere hardheidsmetingen uit te voeren met minimale interactie door de gebruiker. Het toestel moet eveneens over een gebruiksvriendelijke interface beschikken waarmee de hardheidsmeter kan worden bediend en waarop parameters zoals het aantal te maken indentaties kunnen worden ingesteld. Om dit hoofddoel te bereiken, worden een aantal subdoelstellingen gedefinieerd.

Een eerste subdoel betreft de integratie van een XY-tafel. Deze zal het te analyseren materiaal bewegen onder de indenter zodat op meerdere plaatsen een meting kan worden uitgevoerd. Hiervoor dient eveneens een sturing ontworpen te worden die de XY-tafel in beide richtingen kan doen bewegen. Deze beweging moet zowel accuraat als repeteerbaar zijn om een nauwkeurigheid te garanderen tot een afstand van 0,05 mm.

Een volgend doel is het automatiseren van het proces om een indentatie te maken. De hardheidsmeter moet op commando van de computer een indentatie kunnen maken en moet ten allen tijden zijn status terugsturen ter controle.

De gemaakte indentatie moet via computervisie kunnen worden geanalyseerd. De hardheidsmeter dient van een camera te worden voorzien die de indentatie opmeet om de hardheid van het materiaal te bepalen. Dit computervisiesysteem moet de hardheid herhaaldelijk nauwkeurig kunnen bepalen met een maximale afwijking van plus minus 10% van de verwachte waarde.

De hierboven besproken doelen zullen worden geïntegreerd in één centrale sturing. Deze sturing zal worden voorzien van een gebruiksvriendelijke interface waarop een operator de nodige parameters kan instellen en de resultaten kan bekijken en bewerken. Deze interface zal eveneens van een handleiding worden voorzien.

1.4 Methode

Om de hardheidsmeter te automatiseren is het noodzakelijk eerst de bestaande opstelling te onderzoeken. Dit onderzoek omvat zowel het huidige proces voor hardheidsmetingen als een evaluatie van de hardheidsmeter zelf. Het doel is om te bepalen op welke gebieden verbeteringen mogelijk zijn en hoe deze kunnen geïmplementeerd worden.

Het automatisatieproces van de hardheidsmeter omvat vier stappen, elk essentieel voor het bekomen van een geautomatiseerde hardheidsmeter.

Een eerste stap betreft de keuze van een centrale microcontroller die de brug vormt tussen de hardheidsmeter, de XY-tafel en de computer. Er wordt geopteerd voor een Arduino UNO omwille van zijn gebruiksvriendelijkheid in zowel programmatie als communicatie. Deze zal commando's ontvangen van de computer die op zijn beurt geprogrammeerde functies in de Arduino zal starten.

Vervolgens dient een sturing voor de XY-tafel ontworpen te worden. Bij dit ontwerp moeten verschillende eigenschappen zoals de spanning en de maximale stroom naar de motor in rekening worden gebracht. Aangezien de stappenmotoren van de XY-tafel werken op een spanning van 5 V en een maximale stroom van 1,2 A wordt gekozen voor een Adafruit motor shield. Deze kan op de reeds gekozen Arduino geplaatst worden en mee worden geïntegreerd in de Arduino softwareomgeving. Deze sturing kan diverse functies uitvoeren, zoals het manueel besturen van de stappenmotoren en het creëren van een indentatiepatroon.

Vervolgens wordt een onderzoek uitgevoerd om een geschikte interfacemethode te ontwikkelen tussen de computer en de hardheidsmeter. Aangezien de communicatie in de voorgaande software gebaseerd was op een serieel communicatieprotocol, is het initiële doel dit protocol te achterhalen. Indien dit protocol niet kan worden achterhaald, zullen de basisfuncties van de hardheidsmeter die nodig zijn voor dit project kunnen worden gestart via de *auxiliary* poort.

Voor de automatisatie van het meetproces zal een computervisiesysteem worden geïmplementeerd. Op de microscoop wordt een camera geplaatst die via de GigE-interfacestandaard beelden zal versturen naar de beeldverwerkingsmodule. Diverse meetmethodes zullen worden geëvalueerd om de meest robuuste en precieze methode te identificeren. Na de keuze van de meetmethode zal deze extensief worden getest en geëvalueerd om te garanderen dat de meting nauwkeurig is.

Bovenstaande subdoelen zullen eerst afzonderlijk worden uitgewerkt. Voor de programmatie van hun respectievelijke functies en computerinterfaces zal gebruik gemaakt worden van LabVIEW.

1.5 Vooruitblik

De komende hoofdstukken zullen de uitwerking en resultaten van deze masterproef toelichten. Beginnend met de literatuurstudie die een onderbouwde basis vormt voor verschillende technische aspecten die gedurende deze scriptie aan bod zullen komen. Hierin wordt bijkomende informatie over het laser cladding proces aangeboden en het ontstaan van de heat affected zone toegelicht. In deze literatuurstudie zal ook uitgebreid de Vickers-hardheidsproef besproken worden, samen met een discussie over hoe deze kan worden uitgevoerd door middel van computervisie.

Hoofdstuk 3 gaat uitgebreid in op de diverse materialen en methoden die zijn toegepast voor de automatisatie van de hardheidsmeter. Elke component wordt gedetailleerd besproken om hun specifieke bijdrage aan het grotere geheel duidelijk te maken voor de lezer.

Hoofdstuk 4 beschrijft het gevolgde proces en de ondernomen stappen die leiden tot het bereiken van een geautomatiseerde hardheidsmeter. Deze resultaten worden in hoofdstuk 5 toegelicht, gevolgd door een algemeen besluit van deze masterproef in hoofdstuk 6.

2 Literatuurstudie

2.1 Laser Cladding

2.1.1 Wat is laser cladding

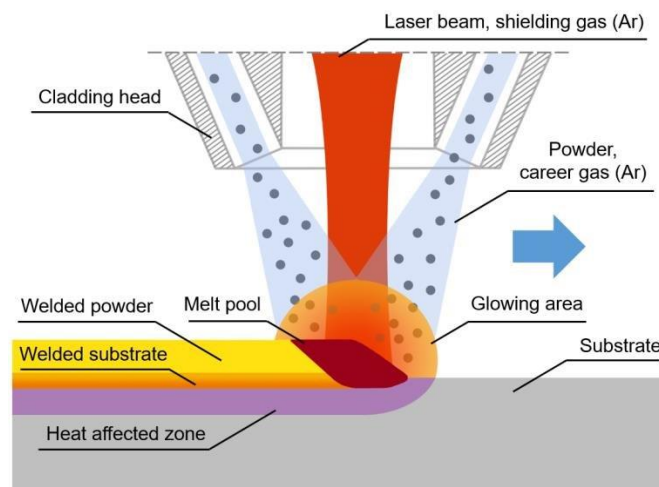
Laser cladding [2], [4], [5] is een lasproces waarbij een coatingmateriaal wordt aangebracht op een onderliggend substraat. Het coatingmateriaal wordt in poeder- of draadvorm in het brandpunt van de laser gebracht en versmelt met de buitenste lagen van het te behandelen materiaal. Bij het afkoelen van het coatingmateriaal vormt zich een nieuwe laag zonder poriën of scheuren die metallurgisch gebonden is aan het onderliggende werkstuk.

De voornaamste toepassing van laser cladding is het aanbrengen van een slijtvaste laag op een onderliggend werkstuk. Door deze techniek kunnen verschillende materialen met verschillende eigenschappen aangebracht worden om de materiaaleigenschappen van het werkstuk te verbeteren. Laser cladding biedt de mogelijkheid een goedkoper, minder geschikt materiaal te combineren met een slijt en corrosie werende coating om zo gebruik te maken van de betere metallurgische eigenschappen van het sterkere coatingmateriaal.

2.1.2 Het proces

Tegenwoordig is laser cladding waarbij het coatingmateriaal in poedervorm wordt aangebracht, de meest voorkomende techniek. Deze methode is meer energie-efficiënt, laat een betere controle van het proces toe en heeft een hogere reproduceerbaarheid dan andere methoden. Figuur 1 illustreert hoe het coatingmateriaal in poedervorm door middel van een draaggas wordt aangebracht in het brandpunt van de laser. Dit draaggas dient eveneens als beschermgas in het lasproces. Het beschermgas zal gedurende het lasproces het smeltbad en het toegevoegde coatingmateriaal beschermen tegen de invloeden van de omliggende lucht. De laser smelt het toegevoegde materiaal, dat na afkoeling metallurgisch met het onderliggende substraat bindt.

Voor het aanbrengen van een kwalitatieve en gelijkmatige coating is gedurende het cladding proces een hoge precisie en accuraatheid nodig. Daarom worden bij laser cladding en vergelijkbare geautomatiseerde lasprocessen robotmanipulators gebruikt. Deze zijn in staat de zware last van het cladding gereedschap te hanteren, repetitief werk te leveren en moeilijke plaatsen te bereiken.



Figuur 1: Laser cladding proces [11, p.2]

2.1.3 Toepassingen

Voor het laser cladding proces kan een breed scala aan coatingmaterialen worden gebruikt. Het aan te brengen coatingmateriaal wordt bepaald door de toepassing van het te behandelen werkstuk. Zo kan er gekozen worden voor een materiaal met corrosie of oxidatie werende eigenschappen of een materiaal dat zorgt voor een zeer harde en slijtvaste laag. Tevens kan ook geopteerd worden voor speciale materialen met smerende eigenschappen of materialen die zorgen voor een thermische beschermlaag.

Laser cladding is eveneens geschikt voor het herstellen van machineonderdelen zoals stoomturbines, pompwaaiers en andere componenten waarbij de aanschaf van nieuwe onderdelen niet kosteneffectief is.

Een andere frequente toepassing betreft het 3D-printen van metalen [6]. De dikte van de aangebrachte laag materiaal kan worden ingesteld tussen 50 μm en 2 mm. Door gebruik te maken van CAD/CAM-software kan de applicatie van de lagen zorgvuldig gepland worden om zo een onderdeel te printen.

2.1.4 Materiaaleigenschappen

Gedurende het lasproces zal het onderliggend werkstuk of het substraat waarop de coating wordt aangebracht, opwarmen. Naarmate de warmte doorheen de bovenste lagen van het substraat trekt, zullen de verschillende lagen een verschillende hoeveelheid warmte voelen. Er ontstaan dus lagen in het materiaal met elk licht verschillende eigenschappen, de zogenaamde *heat affected zone*.

De warmte zal een invloed hebben op het onderliggende materiaal. Een mogelijk effect van deze warmte is een variërende hardheid naarmate hogere lagen worden bereikt.

2.2 Vickers-hardheidsmeting

2.2.1 Inleiding

Het meten van de hardheid van materialen speelt een cruciale rol in de wereld van materiaalwetenschap en industrie. Het is een fundamenteel aspect van kwaliteitscontrole en materiaalkeuze in productieprocessen. Het meten van de hardheid van materialen verschaft inzicht in hun weerstand tegen permanente deformatie, slijtage en schade. De hardheid van een materiaal is gedefinieerd als de weerstand tegen een indrukkende kracht.

2.2.2 De Vickers-hardheidsmeting

De Vickers-hardheidsmeting [7] berust, net als verschillende andere methoden voor hardheidsmetingen, op het opzettelijk veroorzaken van een plastische indruk in een testmateriaal. De hardheid van een materiaal kan vervolgens worden bepaald uit de afmeting van de achtergelaten indruk.

In tegenstelling tot sommige andere testmethoden, zoals de Brinell-hardheidstest, is de grootte van de indenter bij de Vickers-hardheidsmeting losgekoppeld van de hardheidsberekening. Dit vereenvoudigt de berekening aangezien er geen rekening gehouden moet worden met de verschillende maten van indentoren bij verschillende indentatiekrachten.

Met de Vickers-hardheidstest kan een uitgebreide reeks aan materialen worden getest. Deze reeks materialen omvat niet enkel metalen maar ook keramische materialen.

2.2.3 Meetprincipe

Het correct uitvoeren van een Vickers-hardheidstest berust op een aantal standaarden en normen die moeten worden gehanteerd. Deze normen worden beschreven in ISO 6507-1 [3]. Enkel wanneer deze normen worden gehanteerd kan met zekerheid worden gezegd dat het resultaat van de hardheidstest representatief is voor de werkelijke hardheid van het materiaal.

De ISO-norm legt onder meer vast dat de vorm van de indenter een rechte piramide is met een vierkante basis en een tophoek van 136° zoals weergegeven in figuur 3. Het uiterste punt van de indenter is vervaardigd uit diamant, wat dankzij zijn buitengewone hardheid garandeert dat het te testen materiaal zal vervormen zonder de indenter zelf te beschadigen.

Voor een Vickers-hardheidstest kunnen verschillende gestandaardiseerde indentatiekrachten worden aangelegd. Er wordt daarom een onderscheid gemaakt tussen micro- en macro-Vickers-hardheidstesten. De maximale kracht bij een micro-hardheidstest is 0,2 kg terwijl dit bij een macro-hardheidstest kan oplopen tot 100 kg.

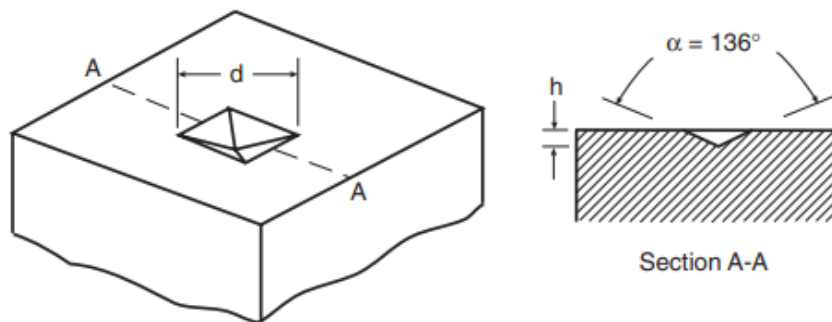
De duur van het toepassen van de kracht speelt ook een cruciale rol. Volgens de ISO-norm mag de tijd die nodig is voor de initiële toepassing van de kracht tot het bereiken van de volledige testkracht niet korter zijn dan 2 seconden en niet langer dan 8 seconden. Eens de volledige testkracht is bereikt, moet deze aangehouden worden voor 10 tot 15 seconden. Dit is de zogenaamde *dwelt-time*. Deze wordt aangehouden om een plastische deformatie te garanderen.

2.2.4 Meetresultaat

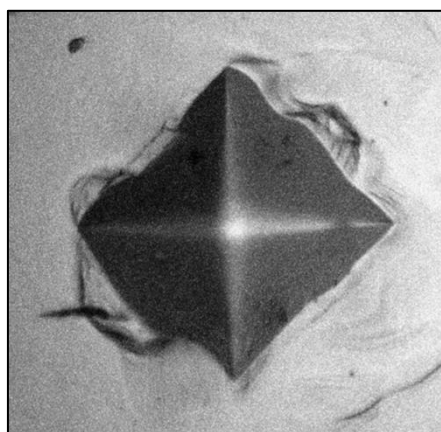
Figuur 2 toont de ruitvormige indentatie die achterblijft na het uitvoeren van een Vickers-hardheidsproef. Zoals eerder vermeld, zal de afmeting van deze indentatie een maat zijn voor de hardheid van het materiaal. De hardheid wordt bepaald door het gemiddelde te nemen van de twee diagonalen van de ruitvormige indentatie. Deze afstand wordt samen met de gebruikte kracht in onderstaande formule ingevuld.

$$HV = 1,8544 * \frac{F [kg]}{d^2 [mm]} \quad (1)$$

Het bekomen resultaat wordt aangeduid met de afkorting HV, voorafgaand door de bekomen waarde en gevolgd door de kracht waarmee de hardheidsmeting wordt uitgevoerd. Indien de dwell-time afwijkend is van de standaardtijd van 10 tot 15 seconden, wordt deze ook vermeld. Een aanduiding van 150HV1 duidt dus op een Vickers-hardheid van 150 kg/mm², getest met een kracht van 1 kg en een dwell-time van 10 tot 15 seconden. 150HV1/20 duidt op hetzelfde resultaat maar met een dwell-time van 20 seconden.



Figuur 3: Vickers-indentatie [7, p. 161]



Figuur 2: Vickers-indentatie foto

2.3 Vickers-hardheidsmeting met computervisie

2.3.1 Waarom computervisie

Het meten van een Vickers-indentatie is doorgaans een procedure die menselijke betrokkenheid vereist. Na het maken van een indentatie, is het de taak van een operator door een microscoop de grenzen van de indentatie vast te stellen. Een proces waarbij een zekere ervaring vereist is. Wanneer er meerdere indentaties op een proefstuk worden aangebracht, zal dit meetproces een aanzienlijke tijd in beslag nemen [8].

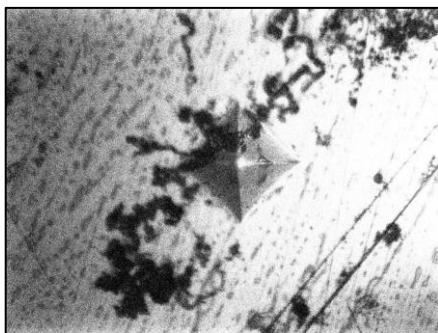
Om de betrokkenheid van een operator te reduceren wordt voor het meten van deze indentaties vaak gebruik gemaakt van een visiesysteem. Dit visiesysteem neemt de rol van de operator over en zorgt voor een automatisatie van het meetproces.

2.3.2 Problemen met computervisie

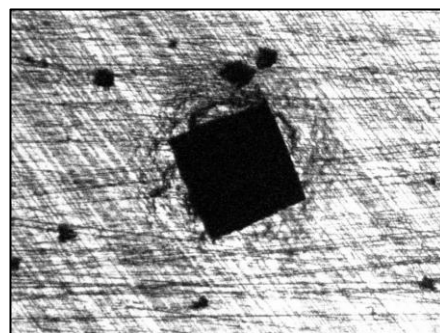
De implementatie van een visiesysteem voor het meten van de Vickers-hardheid stoot vaak op een aantal uitdagingen en problemen. Door onder meer vervuiling of defecten in het proefstuk (figuur 5), verschil in materiaaleigenschappen of verandering van de belichting kan het gemeten resultaat sterk variëren van de werkelijke waarde of zal de meting compleet onmogelijk worden [9].

Deze verandering in verlichting wordt voornamelijk door twee factoren beïnvloed. De eerste heeft betrekking tot de lichtbron. Wanneer gebruik gemaakt wordt van een lichtbron zoals een halogeenlamp kan de hoeveelheid licht wijzigen naarmate de lamp opwarmt. De tweede factor is de reflectiviteit van het te meten materiaal. Een materiaal met een matte afwerking zal in sommige gevallen onvoldoende licht reflecteren naar de camera om een meting uit te voeren. Anderzijds zal een hoog reflecterend materiaal dan weer te veel licht reflecteren waardoor het beeld overbelicht wordt.

Een andere probleem ontstaat wanneer de indenter niet haaks is uitgelijnd ten opzichte van de sensor van de camera. Hierdoor zullen de diagonalen van de indentatie verkeerd gemeten worden. Deze slechte uitlijning wordt getoond op figuur 4.



Figuur 5: Vervuiling van te meten indentatie en ongelijke verlichting



Figuur 4: Slechte uitlijning camera t.o.v. indenter

2.3.3 Oplossingen

Voor het opmeten van de indentatie zijn verschillende beeldverwerkingstechnieken beschikbaar. De uitdaging ligt in het bepalen van de juiste techniek en het correct en zo optimaal mogelijk toepassen ervan. In gelijkaardige toepassingen wordt regelmatig gebruik gemaakt van beeldsegmentatie en blob-analyses[10] maar ook technieken zoals neurale netwerken en machine learning worden frequent toegepast.

Zoals eerder vermeld is een goede belichting van de te meten indentatie van essentieel belang. De belichting moet consistent zijn en loodrecht op de indentatie staan. Het gebruik van een collimator in de lens zal zorgen voor een gelijkmatig verdeelde belichting.

Om een minimum aan defecten of vervuiling van het proefstuk te garanderen, zal dit voor een indentatie voldoende moeten worden gepolijst. Deze glanzende oppervlakteafwerking zal ook zorgen voor voldoende lichtreflectie naar de lens van de camera.

Omdat deze reflecterende eigenschap afhankelijk is van het type materiaal zal het weerkaatste licht niet voor elk proefstuk gelijk zijn. Om deze reden moet de verlichtingsbron kunnen gedimd worden naarmate het oppervlakte meer reflecterend wordt.

2.3.4 Conclusie

Er kan worden geconcludeerd dat wanneer een visiesysteem wordt toegepast voor het meten van de Vickers-hardheid, een zorgvuldige keuze moet gemaakt worden over verschillende aspecten van de meetopstelling. Voor de gekozen beeldverwerkingstechniek zullen de nodige parameters zo correct mogelijk moeten worden ingesteld. Deze moeten geschikt zijn voor een breed scala aan omstandigheden om voor elke meting een nauwkeurig resultaat te bekomen.

3 Materiaal en methode

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zullen de verschillende componenten die zijn gebruikt voor het automatiseren van de hardheidsmeter worden toegelicht. Er zal zowel gesproken worden over de gebruikte hardware als software. Deze uitleg dient een beeld te scheppen over de rol van de specifieke componenten en hoe deze passen in het groter geheel.

3.2 LabVIEW

LabVIEW is een door National Instruments (NI) ontwikkelde grafische programmeeromgeving die voornamelijk wordt gebruikt voor data-acquisitie, verwerking van data en industriële automatisering.

Deze visuele programmeeromgeving biedt de mogelijkheid om meteen een grafische gebruikersinterface te koppelen aan de achterliggende code, wat het ontwikkelen van nieuwe programma's aanzienlijk vereenvoudigt. Ook kunnen programma's grafisch worden gedebugd door het visueel weergeven van de verschillende datastromen.

NI biedt de mogelijkheid verschillende extra modules en uitbreidingen te integreren in LabVIEW. Eén van deze modules is NI-VISA, welke wordt gebruikt voor seriële communicatie tussen LabVIEW en de Arduino. Ook wordt er gebruik gemaakt van NI-IMAQdx en NI Vision Assistant voor het ontwikkelen en integreren van computervisie voor het meten van de gemaakte Vickers-indentatie. Vision Assistant is een grafische programmeeromgeving voor visietoepassingen waarbij verschillende bewerkingen en analyses op een beeld kunnen worden toegepast om een zo optimaal mogelijke oplossing te bereiken.

Na programmatie van de software in een ontwikkelingsomgeving biedt LabVIEW de mogelijkheid het geschreven programma om te vormen in een uitvoerbaar programma. Dit kan dan worden geëxporteerd en geïnstalleerd op andere computers.

In deze masterproef zal LabVIEW worden gebruikt voor het voorzien van een grafische gebruikersinterface, het versturen van commando's naar de Arduino voor het bewegen van de XY-tafel en het maken van verschillende indentatiepatronen. Daarnaast zal LabVIEW ook worden toegepast voor het meten van de indentaties door middel van computervisie. Al deze functies worden samengevoegd in één programma dat voorzien is van de grafische gebruikersinterface.

3.3 Arduino

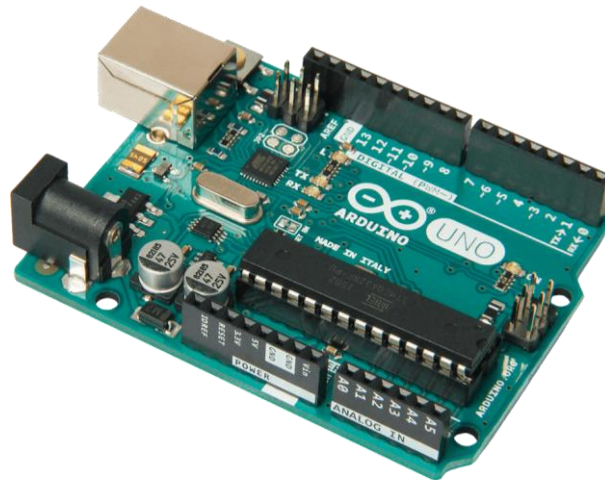
Arduino is een *opensource* microcontrollerplatform met bijhorende ontwikkelingssoftware die kan worden ingezet voor diverse automatiseringstoepassingen. De microcontroller (figuur 6) beschikt over een aantal analoge en digitale in- en uitgangen waarop verschillende sensoren en actuatoren kunnen worden aangesloten. Via de ontwikkelingssoftware kunnen deze in- en uitgangen worden gelezen en aangestuurd voor het uitvoeren van diverse taken.

De Arduino wordt ingezet om de brug te vormen tussen de LabVIEW softwareomgeving en de aan te sturen hardware. Deze wordt geprogrammeerd met verschillende acties die worden uitgevoerd bij het ontvangen van een commando afkomstig van LabVIEW via seriële communicatie.

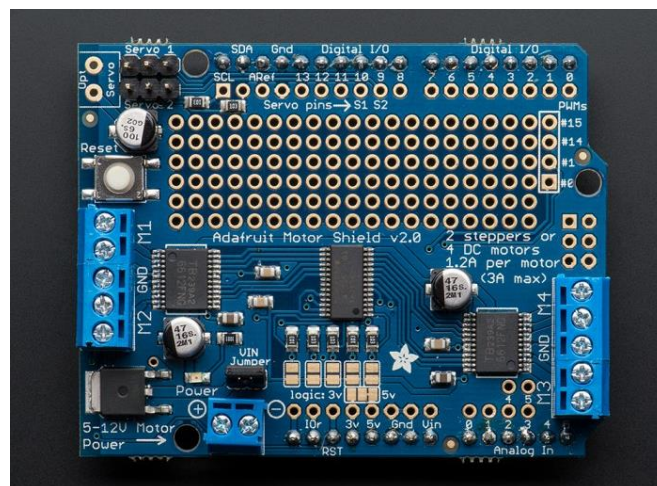
3.4 Adafruit Motor Shield

De Adafruit motor shield is een hardware- en softwarematige uitbreiding voor de Arduino. Deze wordt op de Arduino geplaatst en voorziet deze van een motorsturing die geschikt is voor zowel DC motoren, servo- en stappenmotoren.

Deze component (figuur 7) is uitermate geschikt en wordt gebruikt voor het aansturen van de twee stappenmotoren van de XY-tafel. Door het aansluiten van een losstaande 5 V voedingsbron op het motor shield kan deze elke winding van de stappenmotoren voorzien van een maximale stroom van 1,2 A. Het motor shield kan tot twee stappenmotoren gelijktijdig bedienen.



Figuur 6: Arduino Uno



Figuur 7: Adafruit Motor Shield

3.5 Hardheidsmeter

De hardheidsmeter die wordt geautomatiseerd, is de Wilson-Wolpert Tukon 2100B. Deze hardheidsmeter is uitgerust met een uitgebreide set functies en eigenschappen die niet alleen gebruiksvriendelijkheid bieden, maar ook automatisatie mogelijk maken.

Door de uitrusting van een gemotoriseerde vijf-positie *turret* kan er eenvoudig gewisseld worden tussen indenter of lens. De turret is voorzien van twee indentoren, elk met een eigen *load cell*, en drie lenzen met vergrotingen van 4X, 10X en 40X. De eerste load cell wordt toegepast bij krachten tot en met 1 kg, terwijl de tweede load cell wordt gebruikt bij krachten tussen 1 kg en 30 kg.

In tegenstelling tot andere hardheidsmeters die gebruik maken van fysieke gewichten voor het toepassen van een indentatiekracht, maakt de Tukon 2100B gebruik van een closed-loop elektronische sturing. De indentatie wordt uitgevoerd door een platform dat op en neer beweegt. Onderaan dit platform bevinden zich de indentoren op de turret met de verschillende lenzen. Een servomotor die statisch bovenaan de machine geplaatst is, zal zorgen voor deze op- en neergaande beweging. Zijn roterende beweging wordt via een overbrenging en een schroefspindel, die bevestigd is aan het platform, omgezet in een lineaire op- en neergaande beweging.

Wanneer een indentatie gemaakt wordt, zal de servomotor het platform en dus de indenter naar beneden in het te testen materiaal doen bewegen. De load cell zal voelen met hoeveel kracht de indenter in het materiaal wordt gedrukt en deze waarde terugsturen naar de sturing van de servomotor. Deze zal afhankelijk van de waarde zijn hoekverdraaiing bijsturen om de indenter meer of minder kracht te doen uitoefenen op het materiaal.

Door deze elementen in een closed-loop systeem te integreren kan er voor gezorgd worden dat steeds de gewenste kracht wordt toegepast op het materiaal.

De parameters voor het uitvoeren van een Vickers-hardheidsproef zoals de indentatiekracht en de dwell-time worden ingesteld op het bedieningspaneel van de hardheidsmeter.

Figuur 8 toont een foto van de hardheidsmeter zonder uitrusting van de gemotoriseerde XY-tafel.



Figuur 8: Wilson-Wolpert Tukon 2100B hardheidsmeter

3.6 XY-tafel

De XY-tafel speelt een cruciale rol in de automatisatie van de hardheidsmeter en de studie van de heat affected zone. Deze biedt de mogelijkheid het proefstuk te verplaatsen onder de indenter om op een volgende plaats een nieuwe indentatie te maken. Hierdoor kunnen verschillende indentatiepatronen zoals een lijn in de X- of Y-richting, een diagonaal of een grid gerealiseerd worden.

De gehele assemblage van de XY-tafel wordt op de hardheidsmeter gemonteerd via één centrale steun. Deze steun staat rechtstreeks onder de indenter zodat wanneer deze zijn kracht toepast op het materiaal, er geen krachtmoment kan ontstaan die de steun of de XY-tafel doet buigen.

De XY-tafel wordt gedurende het volledige meetproces gebruikt. Eerst wordt deze ingezet om het proefstuk naar verschillende locaties te verplaatsen voor het maken van de vereiste indentaties. Nadat alle nodige indentaties zijn gemaakt, wordt de XY-tafel opnieuw gebruikt om de locaties van deze indentaties te doorlopen, zodat de camera ze kan analyseren en meten.

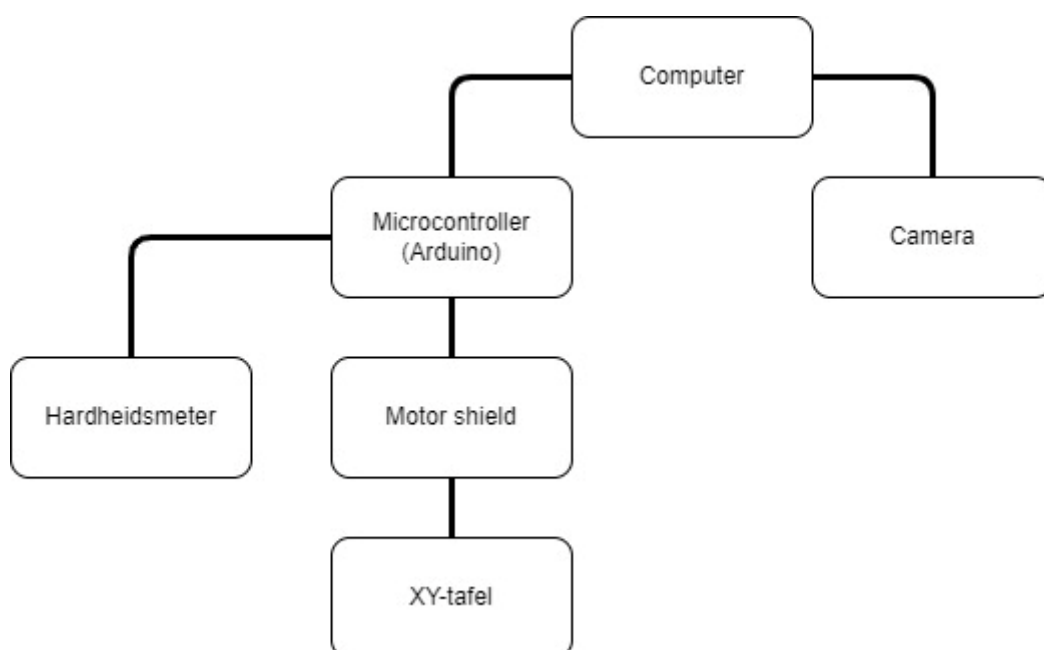
3.7 Camera

Ter automatisatie van het meetproces wordt een camera geïmplementeerd. Deze zal een beeld van de gemaakte indentatie ter verwerking aanbieden aan het computervisiesysteem. Op deze manier wordt het mogelijk een indentatie te meten zonder interactie van een operator.

De camera die wordt gekozen voor deze toepassing is de Daheng Imaging MER2-202-60GM/C-P. Een 2 megapixel, GigE-compatibele camera met een resolutie van 1600x1200. Deze wordt gekozen omwille van eigenschappen zoals automatische aanpassing van *exposure* en *white balance*. Deze stellen de camera in staat zich aan te passen aan verschillende hoeveelheid belichting bij verschillende lenzen en variërende hoeveelheid reflectie bij verschillende materialen. Het GigE-protocol zorgt voor een naadloze integratie in LabVIEW.

3.8 Opstelling

Figuur 9 biedt een schematische weergave van de complete opstelling en de onderlinge verbindingen van de diverse componenten die samen een geïntegreerd geheel vormen.



Figuur 9: Schematische weergaven van de opstelling

4 Uitwerking

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat gedetailleerd in op de werking en integratie van de diverse componenten. Het naadloos integreren van deze componenten is wat uiteindelijk zal leiden tot een geautomatiseerde hardheidsmeter.

4.2 XY-tafel

4.2.1 Werking

Zoals eerder vermeld in paragraaf 3.6, wordt de beweging van de XY-tafel mogelijk gemaakt door twee stappenmotoren, elk voor een specifieke richting. Deze motoren zijn door middel van een getande riemoverbrenging aan schroefspindels verbonden. Hierdoor wordt de roterende beweging van de stappenmotor omgezet in een lineaire beweging van de moer op de spindel. Deze moer is bevestigd aan het beweegbare platform van de XY-tafel, waardoor het platform in twee richtingen kan bewegen.

Door correcte sturing van deze stappenmotoren kan de XY-tafel zeer nauwkeurige bewegingen uitvoeren. Deze sturing wordt voorzien door de Arduino, gekoppeld met de Adafruit motor shield.

Het platform van de XY-tafel wordt ondersteund door lineaire geleiders om continu stabiliteit te bieden, zelfs tijdens de toepassing van een kracht door de indenter. Ze zorgen tevens dat het platform geen ongewenste speling ervaart in niet ondersteunde richtingen.

4.2.2 Programmatie

Sturing

De programmatie van de verschillende functies en bewegingen van de XY-tafel gebeuren in de Arduino programmeeromgeving. Hierin worden de nodige bibliotheken voor het gebruiken van het Adafruit motor shield toegevoegd. Deze bibliotheken bieden een aantal extra voorgeprogrammeerde functies voor het definiëren van motorparameters, zoals het aantal stappen per omwenteling. Aangezien de motoren op de XY-tafel een nauwkeurigheid hebben van $1,8^\circ$ per stap, betekend dit 200 stappen per omwenteling. Ook zijn er functies voor het definiëren van de snelheid in RPM en voor het al dan niet uitschakelen van de houdstroom van de motor. Deze zullen later van belang zijn om een maximale nauwkeurigheid te bereiken.

De Adafruit bibliotheek biedt een 'step'-functie voor het roteren van de stappenmotor. In deze functie kan zowel het aantal te zetten stappen als de draairichting worden opgegeven samen met de stapmethode. Hierbij is gekozen voor de 'double' methode, waarbij twee statorpolen per stap actief zijn. Deze methode vergroot het koppel en vermindert de kans op slippen van de rotor, wat de nauwkeurigheid van de stappenmotor verhoogt.

Kalibratie

Voor het uitvoeren van accurate en precieze bewegingen dient de XY-tafel te worden gekalibreerd. Deze kalibratie zal de relatie tussen het aantal gezette stappen en de verplaatste afstand in millimeter vastleggen.

Voor een bepaald aantal stappen wordt de afgelegde afstand gemeten door een meetklok met een nauwkeurigheid van 0,01 mm. Dit proces wordt meermaals herhaald voor eenzelfde aantal stappen, waarbij het gemiddelde van deze afstanden wordt genomen om de afstand per stap te bepalen.

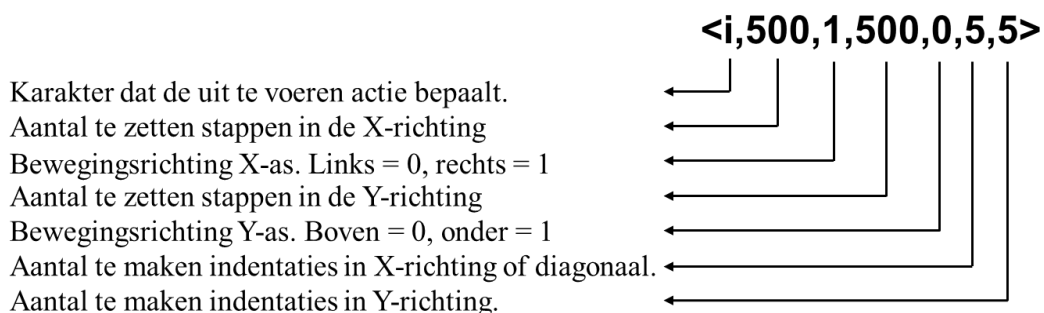
Door de bekomen factor van 0,0018 mm per stap kan in de gebruikersinterface gewerkt worden met millimeter in plaats van te zetten stappen. LabVIEW zal de conversie naar benodigde stappen uitvoeren en deze informatie via het communicatieprotocol doorsturen naar de Arduino.

Communicatieprotocol

De verschillende acties van de XY-tafel die zijn geprogrammeerd in de Arduino, worden opgeroepen door middel van seriële communicatie vanuit LabVIEW. Hiervoor wordt een communicatieprotocol afgesproken om een gestandaardiseerde vorm van data-uitwisseling te creëren. De opbouw van dit protocol is als volgt.

Het gebruik van '<' en '>' markeert het begin en einde van de boodschap. Het Arduino programma zal alle data voorafgaand aan of na deze markeringen negeren en uit de seriële buffer verwijderen. Tussen de verschillende stukken data in het protocol wordt een komma geplaatst. De code die het protocol splitst in individuele stukken data zal zoeken naar deze komma om te bepalen waar een splitsing is vereist.

Het protocol is opgedeeld in zeven datasegmenten: een karakter voor de uit te voeren actie, de richting en het aantal stappen voor bewegingen in de X-richting, de richting en het aantal stappen voor bewegingen in de Y-richting, evenals de omvang van het indentatiepatroon in zowel de X- als Y-richting. Een commando voor het zetten van 500 stappen in de X-richting ziet er dus als volgt uit: <x,500,1,0,0,0,0>. Terwijl het maken van een vijf bij vijf gridpatroon, met een tussenafstand van 500 stappen in de X- en Y-richting, er als volgt uitziet: <i,500,1,500,1,5,5>. Figuur 10 biedt verdere verduidelijking over de opbouw van het communicatieprotocol.



Figuur 10: Opbouw communicatieprotocol

Opbouw sturingsprogramma

De kern van het Arduino sturingsprogramma is opgebouwd rond een 'switch/case'-structuur. Afhankelijk van het ontvangen karakter uit het protocol zal de overeenkomstige 'case' in de switch worden aangesproken. Deze cases komen overeen met de verschillende bewegingen en acties die de hardheidsmeter en de XY-tafel kunnen uitvoeren. Tabel 1 geeft een overzicht van deze verschillende acties. Deze worden later nog verder toegelicht.

Tabel 1: Bewegingen en acties van de geautomatiseerde hardheidsmeter

| Karakter | Actie |
|----------|--|
| X | Verplaats in de aangegeven X-richting met het aangegeven aantal stappen. |
| Y | Verplaats in de aangegeven Y-richting met het aangegeven aantal stappen. |
| H | Breng de XY-tafel naar zijn home positie. |
| T | Ga de randen van het te maken indentatiepatroon af ter controle van de plaatsing. |
| I | Creëer een grid-vormig indentatiepatroon met het gespecificeerde aantal indentaties in de X- als Y-richting, zowel als het aangegeven aantal stappen ertussen. |
| M | Meet de indentaties in het gemaakte grid-vormig indentatiepatroon. |
| Z | Keer terug naar de eerste indentatie van het gridpatroon. |
| L | Breng de in de gebruikersinterface aangegeven indentatie in beeld. |
| D | Creëer een diagonaal met het aantal aangegeven indentaties en de onderlinge X- en Y-afstand voor het bereiken van de opgegeven hoek. |
| U | Meet de indentaties in het gemaakte diagonale indentatiepatroon. |
| V | Breng de eerste indentatie in beeld onder de 40X lens. |

Veiligheid

Door de seriële communicatie en het verzenden van dit protocol van LabVIEW naar de Arduino, gevolgd door de uitvoering van een vooraf geprogrammeerde opdracht, is er geen doorlopende feedback tussen de twee controllers. Wanneer in de gebruikersinterface op stop wordt gedrukt tijdens het uitvoeren van een programma zal de machine niet onmiddellijk stilvallen. Deze zal steeds zijn programma afwerken om daarna te wachten op een nieuwe taak. Dit is uiteraard niet wenselijk wanneer de machine moet worden gestopt omwille van veiligheidsredenen of problemen veroorzaakt door andere invloeden.

Om deze reden wordt een *handshaking*-protocol geïmplementeerd. Een protocol waarbij een *client*, in dit geval de Arduino, een signaal stuurt naar de *host*, LabVIEW, om te vragen of deze nog actief is. Indien de Arduino geen antwoord ontvangt zal deze zijn actie onderbreken.

Voor het bewaken van de bewegingslimieten is de XY-tafel uitgerust met eindeloopschakelaars, twee per bewegingsrichting. Wanneer deze wordt geschakeld zal de beweging worden stopgezet om overbelasting of schade te voorkomen.

Lokalisatie

De XY-tafel maakt gebruik van een relatief coördinatensysteem. De absolute positie ten opzichte van *home* is niet van belang bij deze toepassing en wordt dus ook niet bijgehouden. Telkens wanneer een nieuw indentatiepatroon wordt gemaakt of gemeten, zal de huidige positie van de XY-tafel als nul worden opgeslagen. Vervolgens kan steeds naar dit startpunt worden gerefereerd.

Verbetering van precisie en herhaalbaarheid

Zoals eerder vermeld dient de XY-tafel over een zeer hoge nauwkeurigheid te beschikken. De verschillende indentaties in het indentatiepatroon dienen op een vaste, onveranderlijke afstand van elkaar te liggen. Een onnauwkeurige sturing zou betekenen dat deze onderlinge afstand tussen verschillende indentaties kan wijzigen.

Niet alleen tijdens het maken van dit indentatiepatroon maar ook tijdens het opmeten van de verschillende indentaties is een hoge nauwkeurigheid vereist. Wanneer de XY-tafel naar de volgende indentatie beweegt en niet voldoende accuraat is, zal de indentatie niet centraal of maar gedeeltelijk in beeld verschijnen wat kan resulteren in een onbruikbare meting.

Om een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid te bereiken wordt een lage rotatiesnelheid ingesteld. Wanneer een hoge rotatiesnelheid wordt ingesteld, zal de motor vanuit stilstand een zeer hoog koppel moeten leveren wat mogelijks resulteert in slippen of het overslaan van enkele stappen.

Een tweede factor die de nauwkeurigheid van de XY-tafel beïnvloedt is de houdstroom of *holding current*. Dit is de stroom waarvan de motor wordt voorzien om tijdens stilstand een houdkoppel te genereren. Een houdstroom wordt voornamelijk gebruikt wanneer de motor tijdens stilstand zou kunnen bewegen onder invloed van de gekoppelde last. Wanneer deze houdstroom wordt uitgeschakeld telkens een nieuw indentatie- of meetpunt bereikt is, zal dit resulteren in een kleine verdraaiing van de motor. Wanneer de stappenmotor stopt met een verdraaiing waarbij een statormagneet niet recht tegenover een rotormagneet staat, zal het wegvallen van de houdstroom zorgen dat deze twee zich aligneren, wat resulteert in een kleine ongewenste extra verdraaiing.

4.2.3 Resultaat

Resultierend uit de hierboven besproken elementen wordt de sturing van de XY-tafel opgebouwd om ten allen tijden zijn diverse functies te kunnen aanspreken. Door het instellen van de lage snelheid en het aanhouden van de houdstroom bereikt de XY-tafel een nauwkeurigheid tot wel 0,01 mm. Deze accuraatheid verzekert dat een indentatie telkens op de juiste plaats zal worden gemaakt, en dat gedurende het meetproces de indentaties telkens centraal in beeld blijven.

4.3 Automatisatie hardheidsmeter

Deze paragraaf beschrijft het automatisatieproces van de eigenlijke micro-Vickers-hardheidsmeter, de Wilson-Wolpert Tukon 2100B. Deze dient te worden voorzien van een computerinterface zodat het indentatieproces kan worden gestart en bewaakt vanuit een centrale computer.

Oorspronkelijk was gepland het seriële communicatieprotocol tussen de voorgaande computer en hardheidsmeter te achterhalen. Op deze manier kon dit protocol gekopieerd worden om dezelfde commando's naar de hardheidsmeter te sturen als zijn bijhorende computer voorheen deed. Met deze methode zouden de verschillende parameters en instellingen kunnen worden gedaan vanaf de nieuwe computer, alsook het indentatie- en meetproces gestart en bewaakt.

Na extensief zoekwerk werd geconcludeerd dat zowel de machine als de computersoftware, niet langer ondersteunt worden door de fabrikanten. Het communicatieprotocol kon dus niet worden achterhaald waardoor de noodzaak ontstond een alternatieve oplossing te vinden.

De hardheidsmeter is voorzien van een bijkomende auxiliary poort die kan worden gebruikt voor het koppelen van uitbreidingen. In deze 15-pin connector is een pin voorzien voor het starten van een indentatie en een pin die een signaal geeft wanneer het indentatieproces bezig is. Deze zullen gebruikt worden voor de automatisatie van de hardheidsmeter.

De pin voor het starten van een nieuwe indentatie, pin 3, fungeert als open schakelaar. Door deze te sluiten en dus te verbinden met de massa op pin 7, wordt een nieuwe indentatie gemaakt. Voor het sluiten van dit contact wordt gebruik gemaakt van een TTL-relais die via de Arduino wordt aangestuurd. Telkens wanneer een nieuwe indentatie moet worden gemaakt, wordt deze relais geschakeld. Tijdens het indentatieproces zal pin 2, die eveneens fungeert als schakelaar, zijn contact sluiten. Dit signaal wordt in de Arduino ingelezen en dient als beveiliging en controle. Het voorkomt dat de XY-tafel zou bewegen tijdens het indentatieproces, wat schade aan de indenter en het materiaal ten gevolgen heeft.

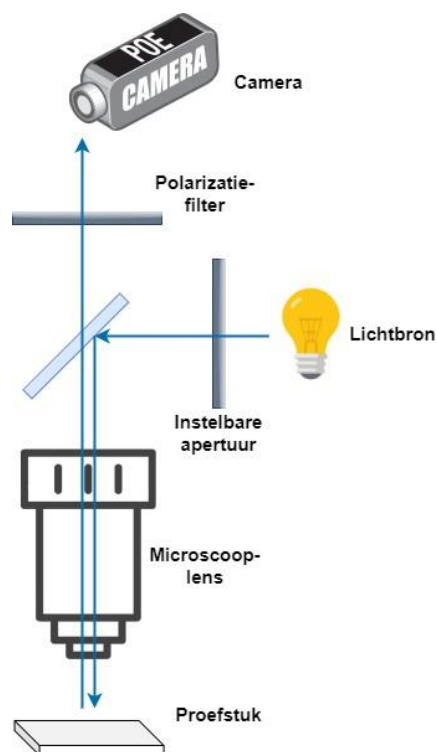
De hardheidsmeter is eveneens voorzien van een handshaking protocol die beveiligt tegen het starten van een indentatie wanneer de computer niet actief zou zijn.

4.4 Hardheidsmeting met computervisie

4.4.1 Opstelling

De camera voor het computervisiesysteem wordt opgesteld zodat deze het gereflecteerde licht van proefstuk ontvangt. Figuur 11 toont deze opstelling. De opstelling is voorzien van een instelbare apertuur waarmee wordt bepaald hoeveel licht van de bron wordt doorgelaten naar het proefstuk. Ook is er een polarisatiefilter aanwezig voor het instellen van de hoek van het door te laten licht. Deze heeft in deze toepassing echter niet veel praktisch nut.

Deze opstelling is niet voorzien van een collimator voor het evenredig verdelen van de lichtbundel over het proefstuk. Dit betekent dat de lichtbron zodanig moet worden gericht dat zijn uitgestraalde lichtbundel loodrecht op het proefstuk valt. Wanneer dit niet zo is, ontstaat er een lichtgradiënt over het proefstuk waardoor het ontwikkelen van een robuust computervisieprogramma nagenoeg onmogelijk wordt.



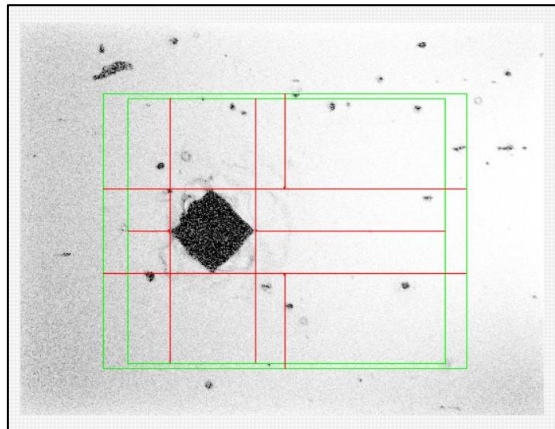
Figuur 11: Opstelling camera

4.4.2 Meetmethodes

In de NI Vision Assistant zijn verschillende methodes beschikbaar voor het meten van objecten. Er dient te worden gekozen voor de meest optimale en robuuste methode om een zo nauwkeurig mogelijk meetresultaat te bekomen. Deze paragraaf analyseert een aantal methodes om te bepalen welke het meest geschikt is voor deze toepassing.

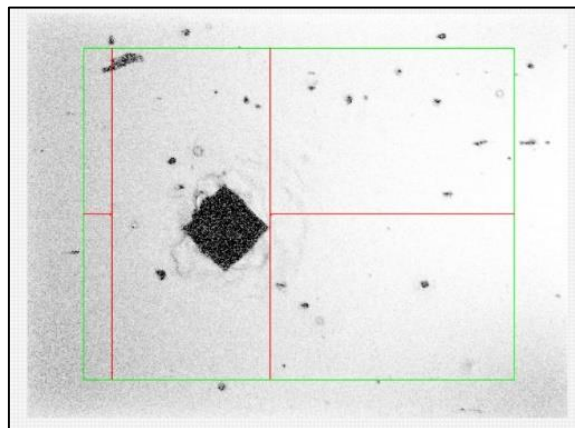
Rake

De *rake*-methode werkt door binnen een vooraf gedefinieerde *region of interest* (ROI) van links naar rechts en van boven naar onder te scannen naar de rand van een object. Deze rand wordt bepaald door een verandering of een verschil in contrast. Nadat deze randen zijn gedetecteerd wordt zowel in de horizontale als verticale richting de afstand tussen de uiterste punten bepaald. Na pixelkalibratie komt de afstand tussen de uiterst horizontale en verticale punten overeen met de lengte van de diagonalen van de ruitvormige indentatie. Met deze lengtes kan vervolgens de hardheid bepaald worden. Figuur 12 toont een voorbeeld van zulke geslaagde meting. Hierin zijn de groene rechthoeken de ROI voor de rake-methode en geven de rode lijnen de uiterste dimensies van de indentatie weer.



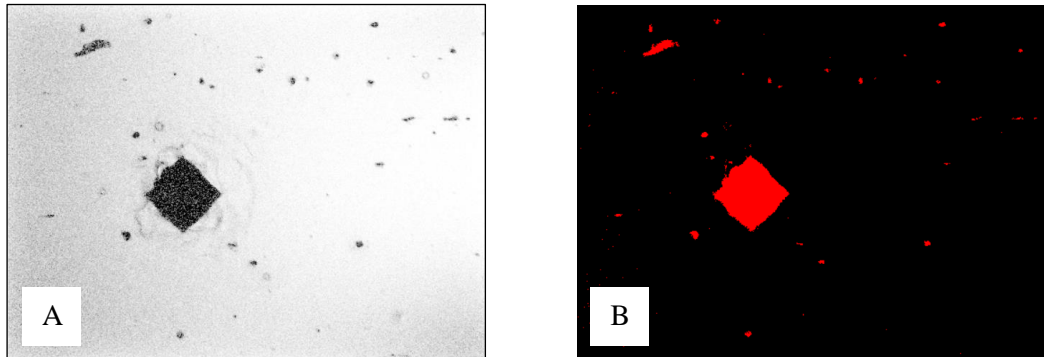
Figuur 12: Geslaagde Rake-meting

Het gebruiken van deze methode stoot echter op enkele problemen. Om verschillende groottes van indentaties te kunnen meten dient een grote ROI te worden gedefinieerd. Wanneer er onzuiverheden zichtbaar zijn in het materiaal zullen deze ook binnen de ROI vallen waardoor hun randen foutief kunnen worden gedetecteerd als de rand van een indentatie. Dit zal uiteraard leiden tot een foutieve meting. Een voorbeeld hiervan wordt weergegeven in figuur 13. Hierop wordt de vervuiling in de linkerbovenhoek van de ROI gedetecteerd als een rand omwille van de plotse overgang in contrast.



Figuur 13: Foutieve Rake-meting

Verschillende beeldverwerkingstechnieken worden toegepast in een poging deze foutieve randdetectie op te lossen. In plaats van een grijswaardenbeeld wordt er overgegaan naar een binair beeldformaat. Hierbij zullen alle objecten in het beeld, die een contrast hebben boven een bepaalde waarde ten opzichte van de rest, behouden worden en aangeduid. Figuur 14 geeft een voorbeeld van deze techniek.



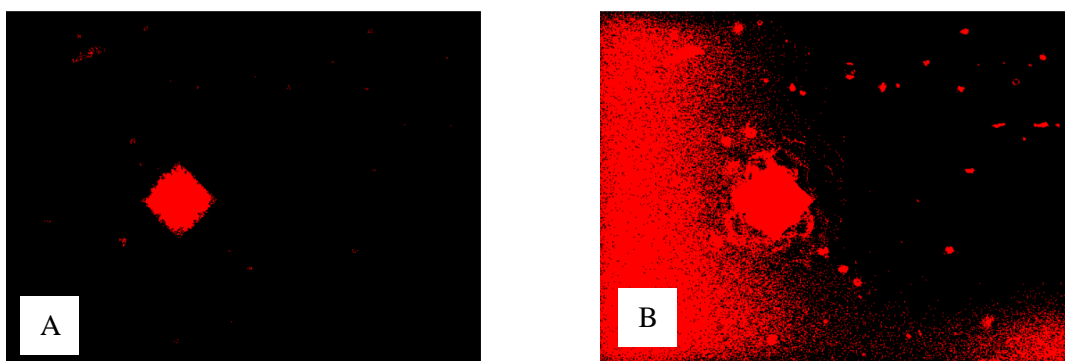
Figuur 14: Grijswaarde (A) vs. Binair (B)

Zoals te zien in het binair beeld van figuur 14b worden deze onzuiverheden nog steeds gedetecteerd omdat deze nagenoeg hetzelfde contrast vertonen als de indentatie met de rest van het materiaal. Wanneer op het binair beeld de rake-techniek wordt toegepast, zal dit resulteren in hetzelfde probleem als in het grijswaardenbeeld. Het uitvoeren van erosie op de objecten in het beeld kan hun grootte verkleinen en zelfs doen verdwijnen, maar dit zal een nadelig effect hebben op de nauwkeurigheid van de meting, aangezien ook de vorm van de indentatie zal verkleinen.

Objectanalyse

Objectanalyse is een beeldverwerkingstechniek die onder meer kan worden gebruikt voor het analyseren en meten van objecten. Deze methode wordt voornamelijk toegepast op binaire beeldformaten, daarom is het cruciaal het binair beeld nauwkeurig te genereren uit het grijswaardenbeeld. Om te bepalen welke objecten worden meegenomen uit het grijswaardenbeeld wordt er gebruik gemaakt van een *threshold*. Deze *threshold* bepaalt op basis van pixelintensiteit of een object al dan niet wordt meegenomen naar het binaire beeld. Hierbij kan zowel gekozen worden voor donkere als lichte pixels. De *threshold* dient zodanig te worden ingesteld dat alle nodige details van het te analyseren object worden meegenomen naar het binaire beeld zonder al te veel vervuiling of onbelangrijke pixels.

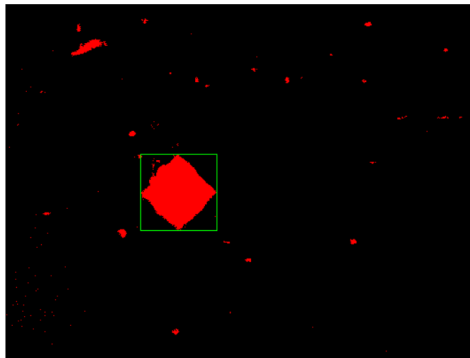
Figuur 15a toont een voorbeeld van een te lage *threshold*. Hierin zijn de randen van de te analyseren indentatie niet correct gedefinieerd waardoor een meting van de diagonalen moeilijk wordt. In figuur 15b is de *threshold*waarde te hoog ingesteld waardoor er veel ruis wordt opgenomen en dus de indentatie niet meer te onderscheiden valt.



Figuur 15: Te lage (A) vs. te hoge (B) threshold

Het instellen van een geschikte threshold zal het beeld van de indentatie correct omzetten naar een binair formaat. Mogelijks kunnen na deze stap nog aanvullende bewerkingen worden uitgevoerd om kleine onzuiverheden te verwijderen.

Na de omvorming naar het binair formaat kan de objectanalyse worden toegepast. Deze zal elk object in het binair beeldformaat analyseren en resultaten zoals de afmetingen en oppervlakte teruggeven. In tegenstelling tot de rake-methode zijn deze afmetingen telkens van één object en worden deze niet beïnvloed door omliggende onzuiverheden. Figuur 16 toont een correcte instelling van de threshold alsook de aanduiding van het te meten object.



Figuur 16: Correcte threshold

Conclusie

Uit bovenstaande analyse van de twee voornaamste meetmethoden wordt geconcludeerd dat metingen door middel van objectanalyse de meest robuuste methode is. Deze biedt de meeste mogelijkheden om een computervisieprogramma te ontwikkelen dat bestand is tegen verandering zoals materiaalzuiverheid en belichting. Ook zal deze methode metingen uitvoeren over het volledige beeld in plaats van een vooraf gedefinieerde ROI.

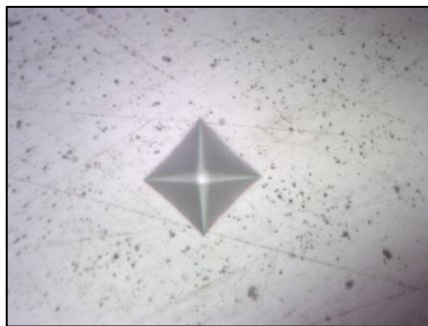
4.4.3 Ontwikkeling visieprogramma

Deze paragraaf beschrijft de ontwikkeling van het beeldverwerkingsprogramma voor het meten van de indentaties. De verschillende stappen voor het bekomen van een duidelijk meetbaar object zullen in detail worden beschreven. De stappen worden in dezelfde volgorde uitgelegd als dat ze worden toegepast op het originele beeld.

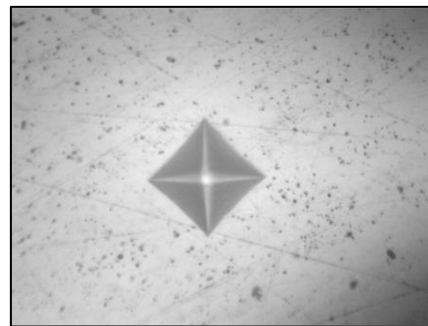
Color plane extraction

De eerste stap in het beeldverwerkingsproces om uiteindelijk een meetbare indentatie te bekomen, is het omvormen van het originele camerabeeld naar een grijswaardenbeeld. Deze omvorming zal de hoeveelheid te verwerken data reduceren en dus de verwerkingssnelheid vergroten. Het omvormen naar grijswaarden maakt ook het toepassen van de threshold-functie eenvoudiger.

Figuur 17 toont het originele kleurenbeeld waaruit de helderheidswaarde wordt onttrokken om het grijswaardenbeeld van figuur 18 te bekomen.



Figuur 17: Origineel kleurenbeeld



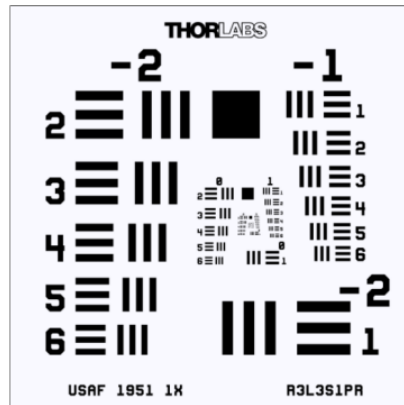
Figuur 18: Grijswaardenbeeld

Image calibration

Voor het verkrijgen van nauwkeurige metingen wordt een kalibratie geïntegreerd in het beeldverwerkingsprogramma. Het meten van een object in het beeld gebeurt door het aantal pixels binnen dit object te tellen. Om dit aantal pixels om te zetten naar werkelijke afmetingen, is kalibratie noodzakelijk.

De kalibratie gebeurt door middel van een kalibratieplaat, weergegeven in figuur 19. Dit is een gestandaardiseerd testpatroon dat met zeer hoge precisie wordt geproduceerd. Op dit testpatroon staan lijnen met verschillende diktes die tot op 0,01 micrometer zijn gedefinieerd. Het in beeld brengen van één van deze lijnen maakt het mogelijk een pixelmeting uit te voeren, waarbij de gekende dikte van de lijn kan worden gekoppeld aan een werkelijke meting. Op deze manier leert het computervisieprogramma de relatie tussen aantal pixels en werkelijke maten zodat deze voor nieuwe metingen kan worden toegepast.

Aangezien de indentaties kunnen gemeten worden met zowel de 10X als 40X lens, dient deze kalibratie uitgevoerd te worden voor beide lenzen. Door in de gebruikersinterface aan te duiden met welke lens gemeten wordt, zal het programma de kalibratie aanpassen.



Figuur 19: Kalibratieplaat

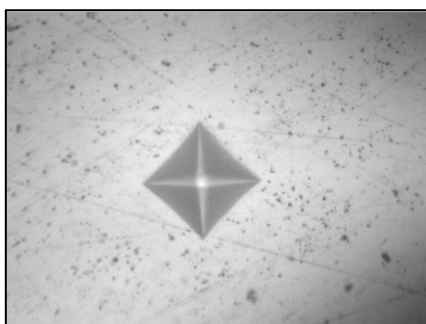
Threshold

Het instellen van een correcte threshold is cruciaal voor het bekomen van een nauwkeurig resultaat. Zoals eerder vermeld zal de threshold-functie de pixels binair groeperen op basis van hun intensiteit en de ingestelde threshold-waarde.

Om een zo robuust mogelijk programma te ontwerpen wordt gebruik gemaakt van een automatische threshold-methode. Deze zal de threshold-waarde aanpassen bij verandering van invallend licht of reflectie van het te meten materiaal. Er wordt gekozen voor de *metric* threshold-methode.

De metric-methode steunt op het berekenen van een waarde op basis van verschillende factoren verkregen uit het beeld en zijn formaat. Door deze waarde te itereren kan een minimum worden bepaald welke overeenkomt met de optimale threshold.

In figuur 20 wordt het beeld na toepassing van de threshold getoond. Aangezien de indentatie donkerder is dan het omringende materiaal omwille van de schuine kanten, wordt er gezocht naar donkere pixels. Door de concentratie van licht in het midden van het beeld ontstaat er een gradiënt naar de randen. Aangezien de randen van het beeld dus ook donkerder zijn, worden deze pixels ook opgenomen in het binair beeld.



Figuur 17: Grijswaardenbeeld



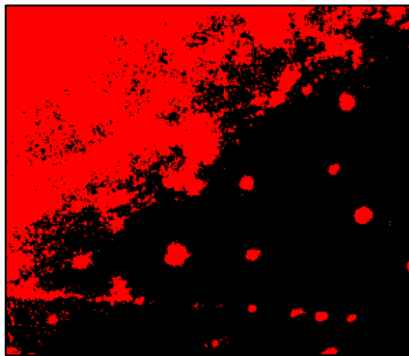
Figuur 20: Beeld na toepassing threshold

Median

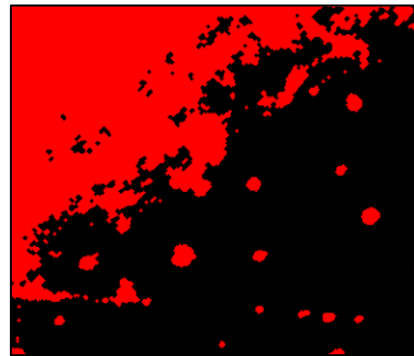
Er wordt een uitmiddelfunctie toegepast om het te verwerken beeld op te schonen en ruis te verwijderen. Deze functie zal het gemiddelde van een drie bij drie pixel patroon nemen en het resultaat toepassen op de centrale pixel. Bijvoorbeeld als zes van de negen pixels in het patroon tot het binair beeld behoren, en dus rood zijn, zal de centrale pixel ook tot het binair beeld behoren.

De grootte en de vorm van dit patroon kan worden aangepast om meer of minder uit het beeld te verwijderen. Om enkel ruis te verwijderen en geen aanpassingen te doen aan de grootte van de te meten indentatie wordt dit patroon zo klein mogelijk gehouden.

Figuur 21 toont een gedeelte van het beeld voor de uitmiding. Figuur 22 toont het bewerkte resultaat waarop zichtbaar minder ruis aanwezig is.



Figuur 21: Sectie voor uitmiding



Figuur 22: Sectie na uitmiding

Remove small objects

Eventuele onzuiverheden in het materiaal kunnen door de threshold-functie meegenomen worden naar het binair beeld. Om te voorkomen dat de objectanalyse al deze kleine onzuiverheden zal analyseren worden deze verwijderd met de functie 'remove small objects'. Figuur 23 toont een beeld waarop deze functie is toegepast. Kleine objecten die bestaan uit slechts enkele pixels zijn hierop verwijderd.

Remove border objects

Zoals eerder vermeld zal de concentratie van belichting een gradiënt doen ontstaan waardoor pixels op de buitenranden worden meegenomen in het binair beeldformaat. Om deze te verwijderen en buiten beschouwing van de objectanalyse te laten, wordt de functie 'remove border objects' toegepast. Het resultaat van deze functie is zichtbaar op figuur 23.



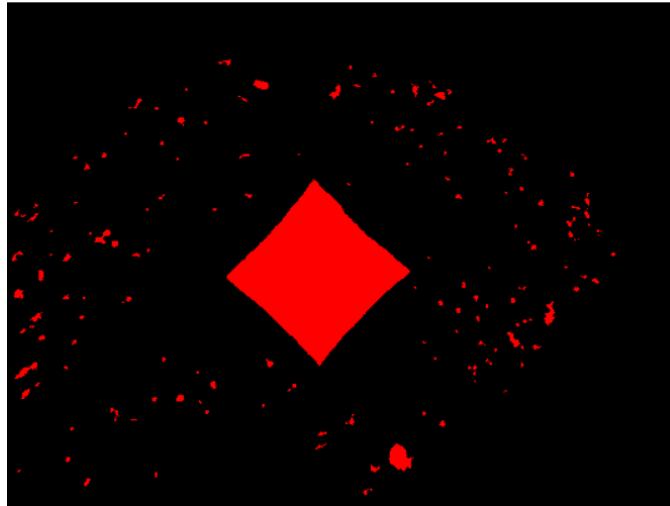
Figuur 19: Beeld na toepassing threshold



Figuur 23: Resultaat na verwijderen van kleine objecten en randen

Fill holes

De positie van de belichting en de vorm van de indenter zorgen dat de diagonalen van de ruitvormige indentatie vaak meer belicht zijn dan de schuine wanden. Hierdoor is de ruitvorm vaak niet volledig gevuld in het binaire beeld. Om dit op te lossen wordt de functie 'fill holes' toegepast. Figuur 24 toont het resultaat van deze bewerking. Op dit resulterende beeld zal de objectanalyse worden toegepast.



Figuur 24: Resultaat van de beeldbewerking

Particle Analysis

Nadat alle voorgaande stappen zijn voltooid, is het resulterende beeld gereed voor de objectanalyse. De objectanalyse zal elk object, elke groep van rode pixels, analyseren en de gevraagde resultaten teruggeven. Om de indentatie te meten en de hardheid te bepalen, moet de objectanalyse zowel de hoogte en breedte van de loodrechte omliggende vierhoek en de oppervlakte van de indentatie berekenen.

Deze meetmethode introduceert echter een kleine meetfout. De Vision Assistant software biedt geen mogelijkheid om de maximale horizontale en verticale lengte van een object te meten, enkel loodrechte afstand tussen uiterste punten. Er bestaat dus de mogelijkheid dat de diagonale afstand van het uiterst linkse punt van de indentatie, tot het uiterst rechtse punt langer is dan de meting die resulteert uit de omliggende vierhoek. Dit treedt op wanneer de uiterste punten niet op één lijn liggen.

Door de camera correct uit te lijnen, wordt deze meetfout aanzienlijk verminderd. De camera moet zo gepositioneerd zijn dat de diagonalen van de ruit loodrecht horizontaal en verticaal in beeld verschijnen.

4.4.4 Integratie in LabVIEW

Na het ontwerp van het computervisieprogramma dient deze geïntegreerd te worden in het LabVIEW hoofdprogramma. Dankzij de naadloze samenwerking tussen de verschillende producten van NI is dit een eenvoudig gegeven. Het computervisieprogramma wordt als een zogenaamde 'Express VI' in het hoofdprogramma toegepast. Dit is een programmabouwsteen waarin het computervisieprogramma wordt opgeroepen en uitgevoerd. Deze bouwsteen werkt als een functie die een bepaalde input vereist, in dit geval het camerabeeld, en op basis hiervan een output genereert. De output is in dit geval de resultaten van de objectanalyse.

De resultaten van de objectanalyse worden geformatteerd in een matrix. Elke rij in deze matrix is een geanalyseerd object. Deze rij begint met een nummer, gevolgd door de gevraagde resultaten. De indentatie die wordt gemeten, zal één van deze objecten zijn. Het is echter niet mogelijk om vooraf te bepalen welk objectnummer aan de indentatie zal worden toegewezen. Om te bepalen welk object de indentatie is, wordt eveneens de oppervlakte van elk object berekend. Door de verschillende beeldverwerkingsstappen zal de indentatie altijd het object zijn met de grootste oppervlakte. Aan de hand van deze waarde kan via LabVIEW de lengte en breedte van de indentatie uit de tabel gehaald worden om de hardheid te berekenen.

Een gedeelte van het resultaat van de objectanalyse is weergegeven in tabel 2. De waarden in kolommen twee en drie worden weergegeven in μm terwijl de waarden van kolom vier in μm^2 zijn. Object 14 stelt de indentatie voor. Hier is duidelijk zichtbaar dat deze oppervlakte aanzienlijk groter is dan de oppervlaktes van de andere objecten.

Tabel 2: Resultaten objectanalyse

| Object # | Bounding Rect Height Calibrated | Bounding Rect Width Calibrated | Area Calibrated |
|----------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 1 | 1,47946 | 3,27595 | 2,27814 |
| 2 | 1,16243 | 0,84541 | 0,62537 |
| 3 | 1,05676 | 1,16243 | 0,59187 |
| 4 | 2,53622 | 3,91 | 6,38772 |
| 5 | 0,63405 | 0,63405 | 0,07817 |
| 6 | 3,4873 | 1,79649 | 2,62433 |
| 7 | 0,84541 | 1,69081 | 0,97156 |
| 8 | 3,80432 | 2,85324 | 4,8913 |
| 9 | 1,16243 | 0,84541 | 0,4802 |
| 10 | 0,10568 | 0,10568 | 0,01117 |
| 11 | 0,63405 | 0,95108 | 0,42436 |
| 12 | 2,74757 | 4,86108 | 4,3776 |
| 13 | 0,95108 | 1,05676 | 0,63654 |
| 14 | 46,70865 | 46,4973 | 1028,3341 |
| 15 | 0,63405 | 0,73973 | 0,36852 |

4.4.5 Meetproces

Het proces voor het meten van de indentaties is opnieuw een samenwerking tussen de verschillende onderdelen van de hardheidsmeter. Nadat de indentor samen met de XY-tafel een indentatiepatroon gemaakt heeft en is teruggekeerd naar zijn startpositie, zal de operator de eerste indentatie in het beeld centreren en het commando voor het starten van het meetproces geven.

Dit startcommando, verstuurd vanuit het LabVIEW hoofdprogramma, zal door de Arduino worden ontvangen. Deze zal een commando terugsturen naar LabVIEW dat een nieuwe meting gestart kan worden. LabVIEW zal het huidige beeld met de te meten indentatie aanbieden aan het computervisieprogramma via de Express VI. Na uitvoering zal dit programma de matrix met meetresultaten genereren en als output uitsturen. Uit deze matrix worden de nodige waarden gehaald en de hardheid berekend. Dit resultaat wordt opgeslagen in een Excel-bestand.

Na voltooiing van het meetproces en het opslaan van de hardheidswaarde, zal LabVIEW een bevestiging naar de Arduino sturen. Vervolgens zal de Arduino de XY-tafel verplaatsen zodat de volgende indentatie in beeld komt. De Arduino stuurt opnieuw een commando naar LabVIEW zodat een nieuwe meting gestart wordt. Dit proces wordt herhaald tot alle metingen zijn uitgevoerd.

4.4.6 Resultaat

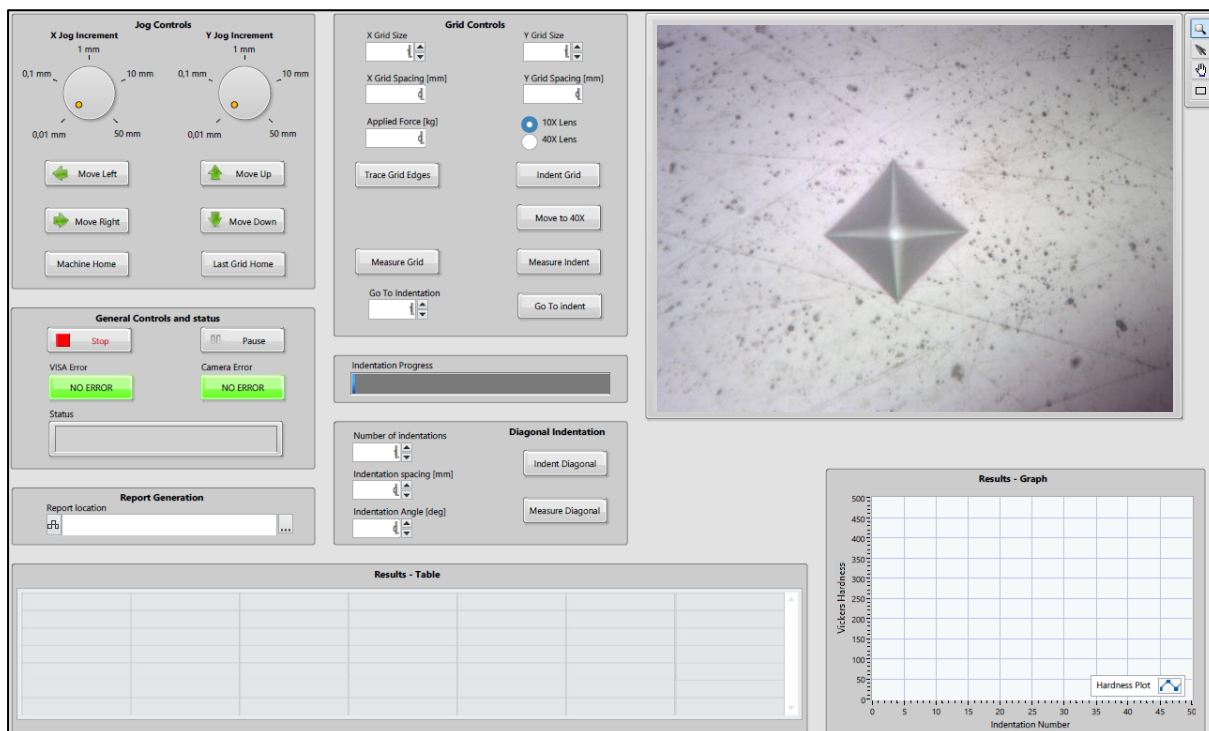
Resultierend uit de ontwikkeling van dit computervisieprogramma is dat de indentaties die door de hardheidsmeter worden gemaakt, volledig autonoom worden gemeten zonder interactie van een operator. De operator kan na het starten van het meetproces de machine onbeheerd achterlaten en terugkeren wanneer alle indentaties zijn gemeten.

Het resultaat van de meting is zowel nauwkeurig als repeteerbaar. Er werden verschillende testen uitgevoerd op gekalibreerd en niet gekalibreerd materiaal, telkens werden de verwachte resultaten bekomen. Een voorbeeld van zulke meting wordt gegeven in het komend hoofdstuk, samen met een verdere bespreking van de meetresultaten.

5 Resultaten

5.1 Gebruikersinterface

Om de besturing van de hardheidsmeter gebruiksvriendelijk te maken, wordt deze voorzien van een grafische gebruikersinterface. Deze interface is verbonden aan het LabVIEW programma. De interface, getoond in figuur 25, wordt voorzien van bedieningselementen zoals manuele bediening en de instellingen voor het maken en meten van indentatiepatronen. Al deze elementen zullen in de verdere paragrafen worden toegelicht.

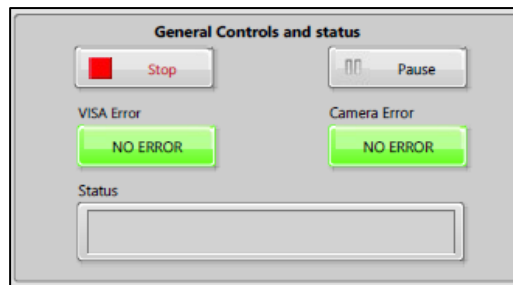


Figuur 25: Grafische gebruikersinterface

5.1.1 General controls and status

Deze sectie van de gebruikersinterface bevat, zoals de titel vermeldt, de algemene bediening en status van de machine. Een close-up van deze sectie is weergegeven in figuur 26. Hier bevindt zich de stopknop die het programma stopt wanneer het meetproces is afgelopen, of wanneer de machine dient te stoppen omwille van een fout. Ook is er een pauzeknop voorzien die het indentatie- of meetproces zal onderbreken. Verder wordt hier ook de status van de communicatie met de Arduino en de camera weergegeven. Het groene vakje van de respectievelijke component zal rood kleuren wanneer een fout optreedt.

Verder zal hier nog de algemene status van de hardheidsmeter en zijn processen worden weergegeven. De status geeft onder andere aan of de Arduino is geïnitieerd, wat zijn voortgang bij het maken van de indentaties is, welke mogelijke fouten er optreden, enzovoort.



Figuur 26: General controls and status

5.1.2 Jog controls

Om de XY-tafel manueel te kunnen bedienen, wordt de gebruikersinterface voorzien van jog-controls. De XY-tafel kan hiermee in alle richtingen worden aangestuurd gebruik makend van het keuzewiel voor de af te leggen afstand en de bijhorende knoppen. Deze knoppen worden in figuur 27 weergegeven.

Deze sectie is eveneens voorzien van een ‘machine home’ knop voor het starten van het homingproces van de XY-tafel. Deze kan worden gebruikt om de XY-tafel terug naar zijn operationeel gebied te brengen wanneer een limietschakelaar wordt geactiveerd.

De knop ‘last grid home’ zal de XY-tafel doen terugkeren naar de eerste indentatie van het laatst gemaakte indentatiepatroon. Als na het maken van verschillende indentaties met de jog-functie wordt gecontroleerd of deze zich op de gewenste plaats bevinden, kan op deze knop gedrukt worden. Dit zal de XY-tafel doen terugkeren naar het begin van het indentatiepatroon, zodat een nieuw meetproces kan worden gestart.



Figuur 27: Jog controles

5.1.3 Grid controls

De sectie grid controls, weergegeven in figuur 28, bevat alle functies voor het maken en meten van grid-vormige indentatiepatronen. Er kan zowel gekozen worden voor een grid-patroon met meerdere rijen en kolommen maar ook voor één enkele rij of kolom wanneer enkel indentaties in een bepaalde richting nodig zijn.

De 'grid-size' velden voor zowel de X en Y-richting geven aan hoeveel indentaties in de respectievelijke richting worden gemaakt. De 'grid-spacing' velden duiden op de onderlinge afstand tussen de indentaties. Het is perfect mogelijk om in verschillende richtingen, verschillende waarden in te geven voor zowel de size als de spacing van de grid.

Het veld 'applied force' dient ter berekening van de hardheid. Aangezien de LabVIEW software niet rechtstreeks de kracht van de hardheidsmeter kan uitlezen, dient deze door de operator hier te worden ingevuld.

Een keuzeschakelaar ter selectie van de lens is voorzien. Deze laat het computervisieprogramma weten met welke lens er gemeten wordt zodanig dat de kalibratie kan worden aangepast.

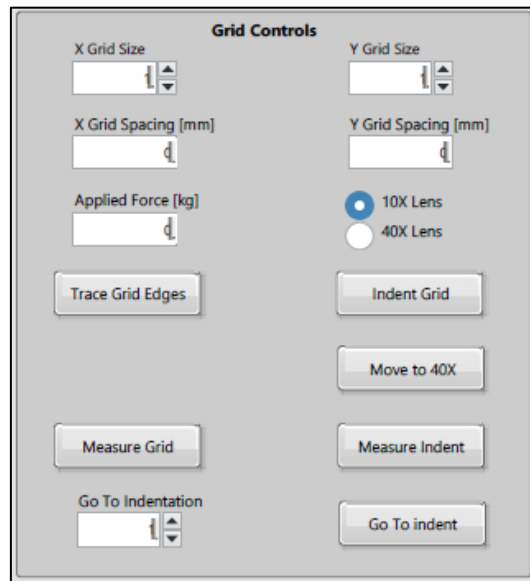
De knop 'trace grid edges' zal de randen van het ingestelde indentatiepatroon afgaan. Deze functie kan worden gebruikt voor het verifiëren van het ingestelde indentatiepatroon. De operator kan visueel controleren of de indentaties binnen het beoogde gebied zullen worden geplaatst en of de XY-tafel niet buiten zijn limieten treedt.

Met de knop 'indent grid' zal het proces voor het maken van het ingestelde indentatiepatroon gestart worden.

Na het indentatieproces, wanneer de XY-tafel is teruggekeerd en de eerste indentatie klaar is om te worden gemeten, is deze mogelijk niet direct zichtbaar bij gebruik van de 40X lens. Om de indentatie bij gebruik van de 40X lens in het midden van het beeld te centreren, kan de knop 'move to 40X' gebruikt worden.

De knop 'measure grid' zal het meetproces voor het meten van het laatst gemaakte indentatiepatroon starten. Daarnaast is de knop 'measure indent' beschikbaar wanneer enkel de huidige indentatie in beeld moet worden gemeten.

Ten laatste zijn nog het veld en de knop 'go to indent' aanwezig. Wanneer het meetproces is afgerond en een aantal indentaties willen worden bekeken voor verder onderzoek, kan de XY-tafel hiermee naar de gevraagde indentatie navigeren.

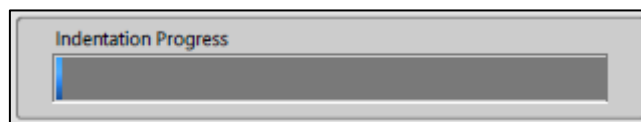


Figuur 28: Grid controls

5.1.4 Indentation progress

De gebruikersinterface bevat een voortgangsbalk zoals getoond in figuur 29. Deze zal toenemen naarmate het indentatiepatroon wordt gecreëerd. Op deze manier kan een operator snel de voortgang van het indentatiepatroon controleren.

Deze voortgangsbalk wordt geüpdatet telkens de Arduino via de seriële communicatie laat weten dat een nieuwe indentatie gestart is. Deze zal de status 'Indenting 5/50' sturen. Deze breuk wordt in LabVIEW omgezet naar een percentage en op de voortgangsbalk toegepast.

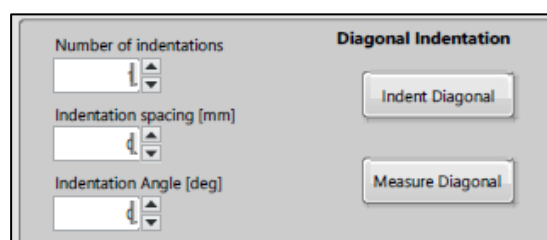


Figuur 29: Indentation progress bar

5.1.5 Diagonal indentation

De optie voor het maken van een diagonaal indentatiepatroon wordt ook toegevoegd. Deze functie kan gebruikt worden voor het uitvoeren van metingen doorheen de verschillende lagen in het materiaal. Door gebruik te maken van een lijn van metingen onder een hoek van 45° zullen deze verschillende lagen getest worden samen met de zones voor en na de overgang. Het gebruik van een verticale of horizontale rechte lijn zou voor deze toepassing minder detail bieden. Door de minimale vereiste ruimte tussen de indentaties bestaat de kans dat een zone of overgang wordt overgeslagen.

Met de velden 'number of indentations' en 'indentation spacing' wordt bepaald hoeveel indentaties en wat hun onderlinge afstand dient te zijn. Het veld 'indentation angle' bepaalt de hoek onder welke deze lijn geplaatst wordt. Deze sectie wordt eveneens voorzien van knoppen voor het maken en meten van het diagonaal indentatiepatroon, zoals in figuur 30 wordt weergegeven.



Figuur 30: Diagonal indentation

5.1.6 Rapportering

De resultaten van het geautomatiseerde meetproces dienen op een overzichtelijke wijze te worden weergegeven en gerapporteerd. Een gestandaardiseerde vorm van rapportering biedt de mogelijkheid de resultaten verder te analyseren met eventueel bijkomende software.

Het gegenereerde rapport bevat verschillende meetwaarden, waaronder het nummer van de indentatie, de toegepaste kracht, de hardheid, de afmetingen van de indentatie en de locatie ervan.

Telkens een nieuwe meting wordt gestart, zal een nieuw Excel CSV-bestand worden aangemaakt. De titel van dit bestand bevat het type meting, zijnde een enkele meting, een grid of een diagonaal samen met de kracht waarmee de indentaties werden gemaakt. Aan dit bestand wordt een *header* toegevoegd met de namen van de waardes in elke kolom. Wanneer een meting wordt voltooid, zullen de vereiste waardes en gegevens worden toegevoegd aan dit bestand. Een voorbeeld van zulk bestand wordt gegeven door tabel 3. De resultaten uit deze tabel worden eveneens weergegeven op de gebruikersinterface, zowel als tabel en grafiek.

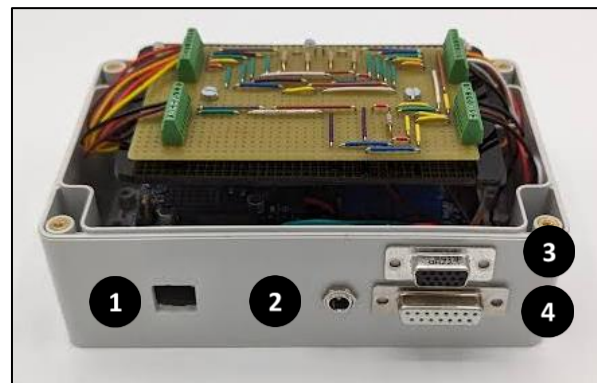
Tabel 3: Voorbeeld van resultatenrapportering

| Ind. Number | Test Force [kg] | Vickers Hardness | Indentation Height [μm] | Indentation Width [μm] | X Grid Position [mm] | Y Grid Position [mm] |
|-------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | HV 1 | 478,655185 | 62,454324 | 62,031621 | 0 | 0 |
| 2 | HV 1 | 481,102502 | 62,348648 | 61,82027 | 1 | 0 |
| 3 | HV 1 | 467,477635 | 63,828108 | 62,137297 | 2 | 0 |
| 4 | HV 1 | 441,908554 | 65,201891 | 64,356486 | 2 | 0 |
| 5 | HV 1 | 458,205582 | 63,616756 | 63,616756 | 4 | 0 |
| 6 | HV 1 | 468,262982 | 63,933783 | 61,925946 | 5 | 0 |
| 7 | HV 1 | 483,568637 | 61,714594 | 62,137297 | 6 | 0 |
| 8 | HV 1 | 479,468879 | 60,763513 | 63,616756 | 7 | 0 |
| 9 | HV 1 | 473,01689 | 63,299729 | 61,925946 | 8 | 0 |
| 10 | HV 1 | 473,01689 | 64,145135 | 61,08054 | 9 | 0 |

5.2 Besturingsmodule

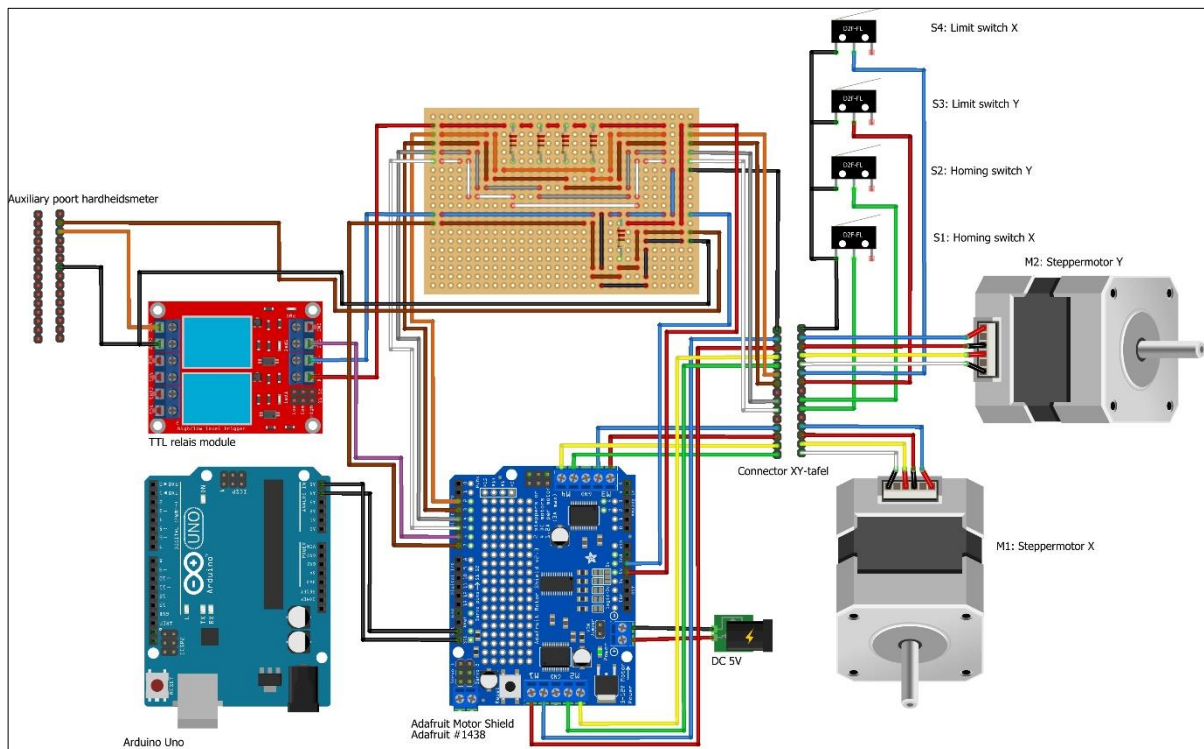
Figuur 31 toont de finale versie van de ontworpen besturingsmodule. In deze behuizing bevinden zich de Arduino met het Adafruit motor shield, de relais voor het starten van een nieuwe indentatie, en de zelf ontworpen en geproduceerde PCB voor het uitlezen van signalen van de XY-tafel en de hardheidsmeter.

De module is van verschillende poorten voorzien. Poort 1 is voor de USB-aansluiting tussen de Arduino en de centrale computer. Hierover zal de seriële communicatie worden gevoerd. Poort 2 is de aansluiting voor de 5 V DC-voedingsbron. Poort 3 is een 15-pin aansluiting voor de XY-tafel. Hierdoor worden de verschillende windingen van de motoren aangestuurd en de data van de eindloopschakelaars ontvangen. Poort 4 zorgt voor de verbinding tussen de hardheidsmeter en de Arduino. Hierdoor wordt het signaal voor het starten van een nieuwe indentatie verstuurd, en de status van het indentatieproces door ontvangen.



Figuur 31: Finale besturingseenheid

Figuur 32 toont het bedradingschema van bovenstaande besturingsmodule. De connector naar de XY-tafel en de auxiliary aansluiting zijn hierop weergegeven, samen met de wijze waarop ze zijn aangesloten. De aansluiting van de XY-tafel is zichtbaar, zowel binnen de besturingsmodule als in de behuizing van de XY-tafel. Ter verduidelijking van het bedradingschema is het Adafruit motor shield niet op de Arduino geplaatst, iets wat in de besturingsmodule wel zo is.



Figuur 32: Bedradingschema besturingsmodule

5.3 Resultaten visieprogramma

5.3.1 Meetfout

De meetfout die optreedt door het niet perfect meten van de diagonaal van de indentatie wordt, zoals eerder besproken, beperkt tot een minimum door het uitlijnen van de camera ten opzichte van de indenter. De afmetingen van enkele indentaties werden zowel door het computervisieprogramma als een externe gekalibreerde microscoop gemeten. Tussen deze twee meetmethoden is het verschil in bekomen hardheidswaarde nooit groter dan 5%.

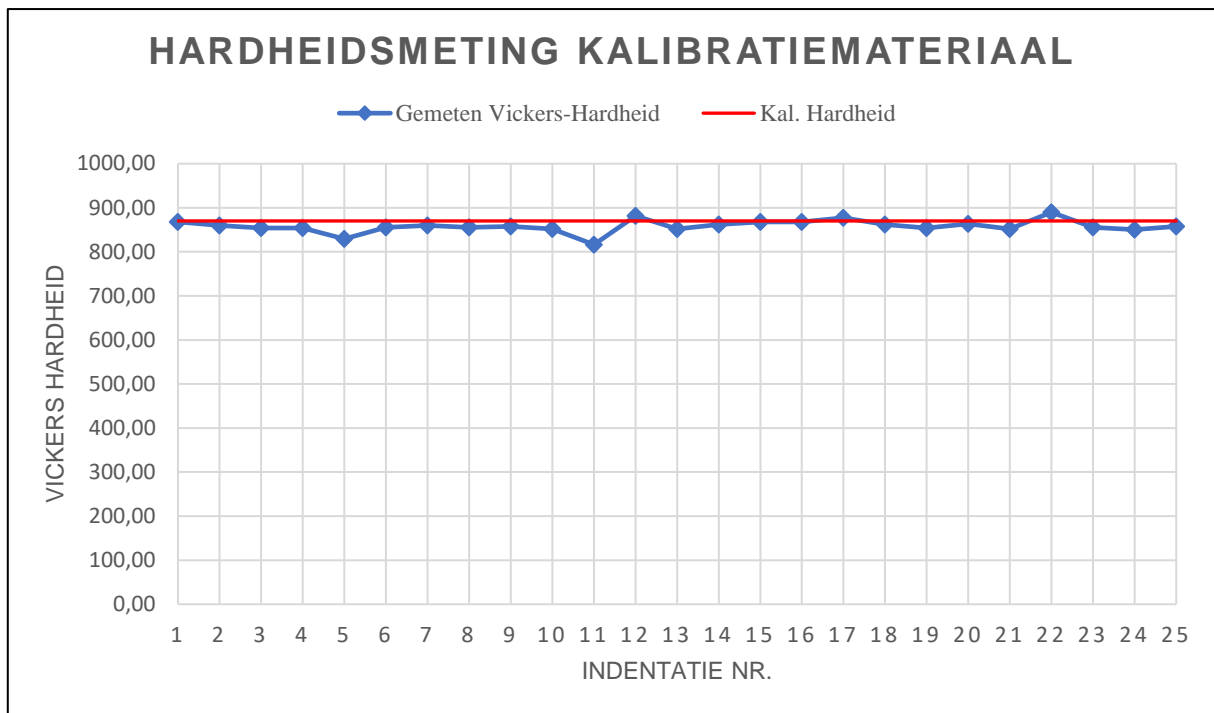
5.3.2 Gekalibreerde meting

Ter verdere validatie van het computervisieprogramma en de andere componenten van de hardheidsmeter zoals de XY-tafel en de indenter, worden een aantal metingen uitgevoerd op een testmateriaal waarvan de hardheid bekend is. Hierop wordt een vijf op vijf gridpatroon gemaakt en de hardheidswaardes gemeten. Deze processen worden volledig autonoom uitgevoerd.

Het gekalibreerde testmateriaal heeft een Rockwell hardheid van 65,4 wat overeenkomt met een Vickers-hardheid van 870. Tabel 4 geeft de meetresultaten van het vijf op vijf gridpatroon uitgevoerd op dit materiaal. Figuur 33 laat het verloop van deze metingen zien en toont ze ten opzichte van de gekalibreerde waarde. Belangrijk om te vermelden is dat zelfs dit gekalibreerd materiaal niet perfect is en kleine variaties in hardheid kan vertonen. Omdat dit testmateriaal al diverse testen heeft ondergaan met grotere indentaties, kunnen er spanningen in het materiaal aanwezig zijn die de hardheidswaarde kunnen beïnvloeden.

Tabel 4: Resultaten gekalibreerde meting

| Ind. Number | Test Force [kg] | Gemeten Vickers-Hardheid | Indentation Height [μm] | Indentation Width [μm] | X Grid Position [mm] | Y Grid Position [mm] |
|-------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | HV 1 | 867,56 | 46,60 | 45,86 | 0 | 0 |
| 2 | HV 1 | 859,68 | 46,50 | 46,39 | 1 | 0 |
| 3 | HV 1 | 853,84 | 46,60 | 46,60 | 2 | 0 |
| 4 | HV 1 | 853,84 | 46,60 | 46,60 | 3 | 0 |
| 5 | HV 1 | 829,22 | 48,08 | 46,50 | 4 | 0 |
| 6 | HV 1 | 855,78 | 46,60 | 46,50 | 4 | 0,5 |
| 7 | HV 1 | 859,68 | 46,92 | 45,97 | 3 | 0,5 |
| 8 | HV 1 | 855,78 | 46,60 | 46,50 | 2 | 0,5 |
| 9 | HV 1 | 857,72 | 46,60 | 46,39 | 1 | 0,5 |
| 10 | HV 1 | 851,91 | 46,92 | 46,39 | 0 | 0,5 |
| 11 | HV 1 | 816,39 | 48,82 | 46,50 | 0 | 1 |
| 12 | HV 1 | 881,60 | 45,86 | 45,86 | 1 | 1 |
| 13 | HV 1 | 851,91 | 46,39 | 46,92 | 2 | 1 |
| 14 | HV 1 | 861,64 | 46,81 | 45,97 | 3 | 1 |
| 15 | HV 1 | 867,56 | 46,29 | 46,18 | 4 | 1 |
| 16 | HV 1 | 867,56 | 46,60 | 45,86 | 4 | 1,5 |
| 17 | HV 1 | 877,56 | 46,50 | 45,44 | 3 | 1,5 |
| 18 | HV 1 | 861,64 | 46,39 | 46,39 | 2 | 1,5 |
| 19 | HV 1 | 853,84 | 46,39 | 46,81 | 1 | 1,5 |
| 20 | HV 1 | 863,60 | 46,39 | 46,29 | 0 | 1,5 |
| 21 | HV 1 | 851,91 | 46,60 | 46,71 | 0 | 2 |
| 22 | HV 1 | 889,79 | 45,65 | 45,65 | 1 | 2 |
| 23 | HV 1 | 855,78 | 46,71 | 46,39 | 2 | 2 |
| 24 | HV 1 | 849,98 | 46,71 | 46,71 | 3 | 2 |
| 25 | HV 1 | 857,72 | 46,71 | 46,29 | 4 | 2 |



Figuur 33: Resultaten gekalibreerde meting

Zoals te zien in bovenstaande tabel en figuur liggen de gemeten waarden steeds dicht bij de verwachte waarde van het kalibratiemateriaal. De grootste afwijking die optreedt ten opzichte van de verwachte Vickers-hardheid van 870 is meting 11, met een afwijking van 6%.

Gelijkaardige metingen werden uitgevoerd op verschillende materialen, en gaven steeds een gelijkaardig resultaat. Steeds binnen de verwachte hardheidswaarde met vaak een maximale afwijking van 5-8%.

6 Besluit

Voor het vormen van een algemeen besluit wordt eerst teruggeblikt naar de doelstellingen van deze thesis. Hierbij diende een micro-Vickers-hardheidsmeter te worden geautomatiseerd om het proces van materiaalanalyse, ter studie van de heat affected zone, te versnellen. De automatisatie moest gebruik maken van LabVIEW en Arduino aangezien dit gekende platformen zijn binnen LCV. De hardheidsmeter diende uiteindelijk in staat te zijn tientallen tot wel honderden metingen uit te voeren met minimale interactie van een operator.

Om deze doelstellingen te bereiken, werden diverse componenten geïntegreerd. In eerste instantie moest een XY-tafel worden toegevoegd om het proefstuk onder de indentor te verplaatsen, en zo doorheen de te bestuderen zone te navigeren. De bijhorende sturing van deze XY-tafel was niet langer bruikbaar dus diende een nieuwe sturing ontworpen te worden. De ontworpen sturing op basis van een Adafruit motor shield maakt de XY-tafel nauwkeurig tot op 0,01 mm. Om dit te bereiken, moeten de stappenmotoren op een relatief lage snelheid draaien, waarbij de houdstroom gedurende het hele proces wordt aangehouden. De beweging van de XY-tafel werd beveiligd door het inlezen van de eindeloopschakelaars en door het toepassen van een handshaking protocol.

Vervolgens diende een manier gevonden te worden om met de hardheidsmeter te communiceren. De pogingen om het bestaande protocol te achterhalen waren zonder succes dus moest een alternatieve methode worden bedacht. De oplossing kwam in de vorm van de auxiliary poort van de hardheidsmeter. Deze bevat een pin voor het starten van een nieuwe indentatie en een pin waarmee het indentatieproces kan worden opgevolgd. Deze werden geïntegreerd in de sturing zodat de hardheidsmeter via een commando een indentatie kan maken en kan worden opgevolgd.

Het integreren van de camera en het computervisiesysteem stelt de hardheidsmeter in staat de gemaakte indentaties volledig autonoom te meten. Na het analyseren van diverse beeldverwerkingsmethoden, werd geconcludeerd dat de methode van objectanalyse de meest robuuste en nauwkeurige meetmethode is. Het ontwikkelde computervisieprogramma zal de indentatie consequent en met een hoge nauwkeurigheid meten, met een maximale afwijking van 5-8% ten opzichte van de werkelijke waarde. Dit is binnen de verwachting en eis die door LCV werd opgesteld.

De integratie van de verschillende componenten die bijdragen aan de automatisatie van de hardheidsmeter gebeurt in LabVIEW. Deze is voorzien van een grafische gebruikersinterface waarop de nodige instellingen voor het uitvoeren van de materiaalanalyses kunnen worden gemaakt.

Er kan uiteindelijk geconcludeerd worden dat de vooropgestelde doelen succesvol zijn behaald. De geautomatiseerde hardheidsmeter is in staat met minimale interactie van een operator een materiaalanalyse uit te voeren waarbij tientallen tot wel honderden individuele metingen worden gedaan. Dankzij deze automatisatie werd een tijdswinst van 70% geboekt ten opzichte van het handmatige proces en heeft LCV opnieuw de mogelijkheid deze analyses binnenshuis te doen.

Referentielijst

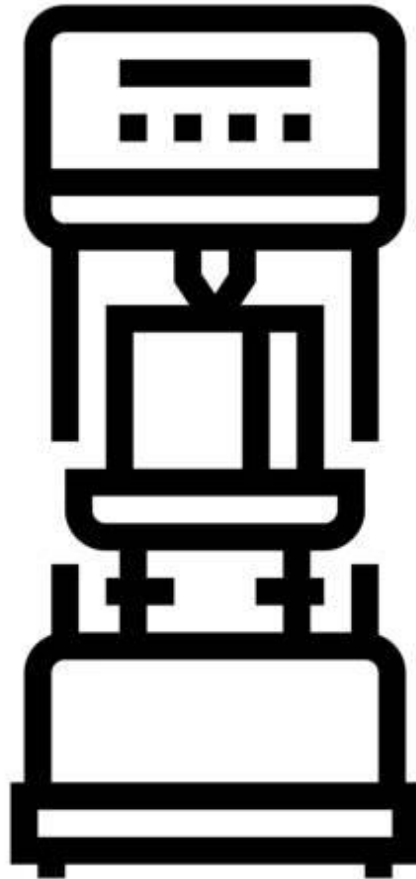
- [1] LCV, “LCV - Services.” Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.lcv.be/nl/services>
- [2] J. Ocaña José L. and Grum, “Laser Cladding,” in *Encyclopedia of Tribology*, Y.-W. Wang Q. Jane and Chung, Ed., Boston, MA: Springer US, 2013, pp. 1926–1934. doi: 10.1007/978-0-387-92897-5_695.
- [3] “ISO 6507-1 Metallic materials-Vickers hardness test-Part 1: Test method Matériaux métalliques-Essai de dureté Vickers,” 1997. Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/64068.html>
- [4] R. Vilar, “Laser cladding,” *J Laser Appl*, vol. 11, no. 2, pp. 64–79, Apr. 1999, doi: 10.2351/1.521888.
- [5] Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, and Stephen F. Corbin, *Laser Cladding*. Boca Raton: CRC, 2005.
- [6] J. Mazumder, “1 - Laser-aided direct metal deposition of metals and alloys,” in *Laser Additive Manufacturing*, M. Brandt, Ed., in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials. , Woodhead Publishing, 2017, pp. 21–53. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00001-4>.
- [7] Norman E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials*, 4th edition. Essex: Pearson, 2013.
- [8] T. Sugimoto and T. Kawaguchi, “Development of an automatic Vickers hardness testing system using image processing technology,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 5, pp. 696–702, 1997, doi: 10.1109/41.633474.
- [9] S. M. Dominguez-Nicolas and P. Wiederhold, “Indentation Image Analysis for Vickers Hardness Testing,” in *2018 15th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICEEE.2018.8533881.
- [10] A. Martín and S. Tosunoglu, “Image Processing Techniques for Machine Vision,” [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:18620971>
- [11] R. V Chkalov and D. G. Chkalova, “Laser Powder Cladding Complex: Principles of Advanced Automated Control,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 969, no. 1, p. 12093, Nov. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/969/1/012093.

Bijlagen

Bijlage A: Handleiding van de geautomatiseerde hardheidsmeter

Hardness Tester

Instruction Manual



Introduction

This instruction manual serves as a comprehensive guide for the automated hardness tester, offering detailed instructions for the proper connection and setup of critical components. It also provides essential information for adjusting machine settings, coupled with a step-by-step guide to effectively employ the machine's various functions. Detailed explanation of different statuses and errors is included.

This manual only contains information that is relative to the automation of the hardness tester and the various components and settings necessary to employ those functions. Further information on the hardness tester itself can be found in its dedicated manual.

Table of contents

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | General setup | 1 |
| 1.1 | Connection to control box | 1 |
| 1.2 | Controller setup..... | 1 |
| 1.3 | Camera setup | 2 |
| 2 | Machine interface | 3 |
| 2.1 | Indentor and lens control..... | 3 |
| 2.1.1 | Selecting indentor/lens | 3 |
| 2.1.2 | Z-Axis / focus controls | 3 |
| 2.1.3 | Starting a single indentation | 3 |
| 2.1.4 | Stopping the indentation..... | 3 |
| 2.1.5 | Lighting controls | 4 |
| 2.2 | Machine interface..... | 4 |
| 2.2.1 | Startup | 4 |
| 2.2.2 | Applied force | 5 |
| 2.2.3 | Dwell time | 6 |
| 3 | User interface | 7 |
| 3.1 | Program start | 7 |
| 3.2 | General controls and status | 7 |
| 3.3 | Jog controls | 8 |
| 3.4 | Grid indentation controls | 9 |
| 3.5 | Diagonal indentation controls..... | 10 |
| 3.6 | Report generation | 10 |
| 4 | Measuring hardness | 11 |
| 4.1 | Single indentation | 11 |
| 4.2 | Grid / Linear indentations | 12 |
| 4.3 | Diagonal indentations | 13 |
| 5 | Status overview | 15 |
| 6 | Error handling | 17 |
| 6.1 | Lens not selected when starting multiple indentations..... | 17 |
| | Notes..... | 19 |

1 General setup

1.1 Connection to control box

The control box shown in Figure 1 houses the components to control the hardness tester. To ensure correct operation, certain connections to and from this box need to be made.



Figure 1: Control box

- **Port 1:** Pass-thru for USB type-b cable.
- **Port 2:** DC-power plug. Requires a 5V, 4A power source.
- **Port 3:** Connection to the XY-stage.
- **Port 4:** Connection to the hardness tester.

1.2 Controller setup

The Arduino controller communicates with the PC via serial communication. This communication protocol requires a setup procedure when changing USB-ports or installing the hardness mapper software on a new PC.

Open device manager and expand the 'ports' tab. The Arduino controller should be in this list as a recognized Arduino device or a standard serial controller. Take note of the port number assigned to this controller. It is labelled as COM followed by the designated number. This number will be required for further setup.

Right-click the controller in the device manager window. Click properties and select the 'port settings' tab. The bits per second number should be changed from 9600 to 115200. Exit the properties window by clicking OK and close the device manager.

Navigate to the PC's program files and access the 'HardnessMapper' folder. Open the 'visa_resource' file using notepad and modify the value following 'COM' to match the number assigned to the Arduino controller displayed in device manager.

1.3 Camera setup

Power is supplied to the camera via Power over Ethernet (PoE). Refer to Figure 2 for guidance on connecting the camera to the PC using a PoE-injector.

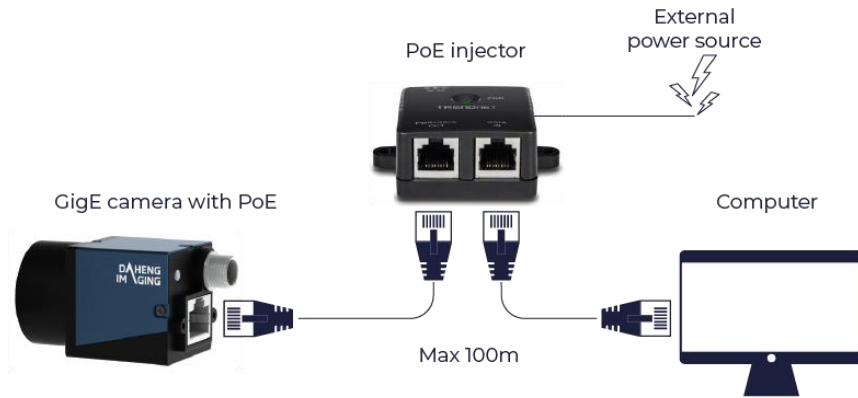


Figure 2: PoE-camera configuration

Additionally, configuring the network port on the PC is necessary to receive the camera's image. Access the PC's network settings and navigate to 'change adapter settings'. Right-click the network port for the connected camera, choose 'properties', and click 'configure'. Then, access the 'advanced' tab and locate 'Jumbo Packets' in the list. Adjust this value to 9014. Close the configuration window by clicking OK.

Reopen the properties window for the network port, then double-click to access the 'TCP/IPv4' settings. Choose 'Use the following IP address' and input the required addresses.

- **IP Address:** 192.168.1.20
- **Subnet mask:** 255.255.255.0
- **Default gateway:** 192.168.1.1

2 Machine interface

2.1 Indentor and lens control

The primary controls for controlling the lens turret, the machine's vertical movement, and the indentor controls are situated at the base of the hardness tester. The control panel is shown in Figure 3.

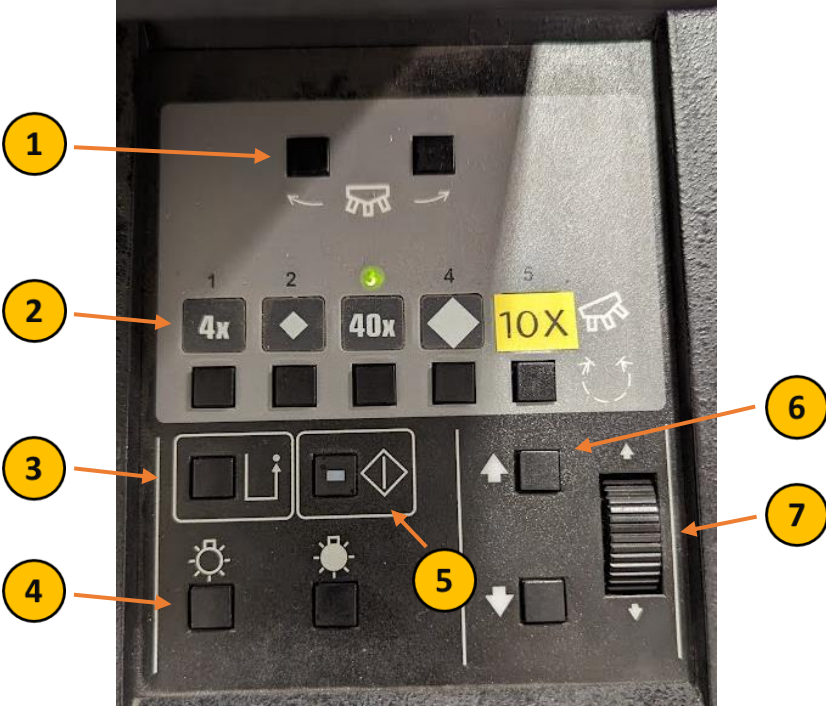


Figure 3: Turret, indentor and Z-axis controls

2.1.1 Selecting indentor/lens

To choose a specific lens or indentor, use the buttons labelled with numbers 1 and 2. The buttons indicated with number 1 facilitate the manual rotation of the turret within its limits. The buttons marked with number 2 correspond to preset positions and directly select the specified lens or indentor indicated above these preset buttons. Three lenses and two indentors are available. The small indentor is used for forces smaller or equal to 1 kg, the big indentor is used for forces above 1 kg.

2.1.2 Z-Axis / focus controls

In order to control the up and down motion of the hardness tester, the buttons and scroll wheel labelled with numbers 6 and 7 can be used. The buttons allow for faster movement but do not provide the same accuracy as the scroll wheel. These controls are mainly used to focus on the specimen or to move the lenses to make room for a new one.

Warning! The speed of the Z-axis movement increases while holding the up or down buttons.
Warning! The lenses can run into the specimen. Slow movements are advised.

2.1.3 Starting a single indentation

When only a single indentation is required, the indentation process can be started using the button labelled with number 5.

2.1.4 Stopping the indentation

The indentation process can be stopped using the button labelled with number 3. This will return the indentor to its ready state.

2.1.5 Lighting controls

The intensity of the specimen lighting can be changed using the buttons labelled with number 4.

Note: Because the camera uses auto-exposure and auto-white balance, changes in this setting will not impact the accuracy of the measurements.

2.2 Machine interface

2.2.1 Startup

To power on the hardness tester, locate and press the ON button situated at the bottom of the interface panel (as depicted in Figure 4). Afterward, select 'OK' to proceed in English, leading to the display of the home page illustrated in Figure 5.

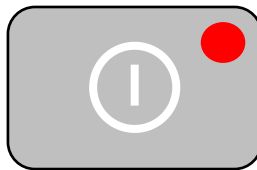


Figure 5: Hardness tester ON/OFF

| | |
|---|--|
| MENU | 1.000 Kg |
| STATISTICS | 10X |
| | 10.0 s |
| D1= --- μm D2= --- μm AV= --- μm | HV 1 I = 0 M = 0 |
| READY FOR IND OR MEAS | |

Figure 4: Hardness tester homepage

The homepage displays the machine's status alongside its present settings for indentation force, dwell time, and the currently selected lens.

2.2.2 Applied force

In order to change the applied force, open the menu by pressing button number 1. The button numbering is shown in Figure 6. Press button 1 once more to open the 'scale' submenu, this submenu is shown in Figure 7.

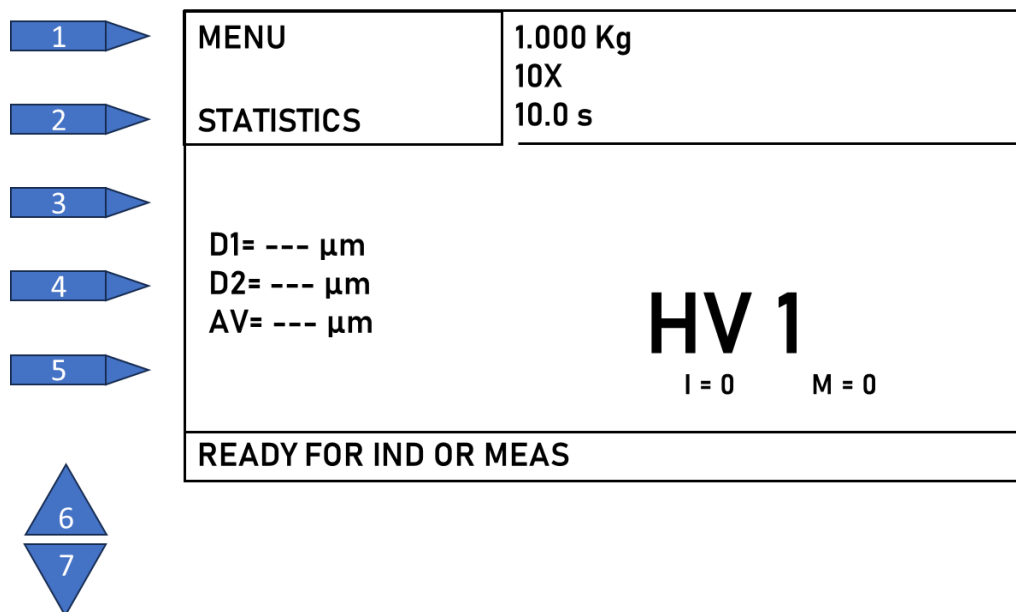


Figure 6: Button layout

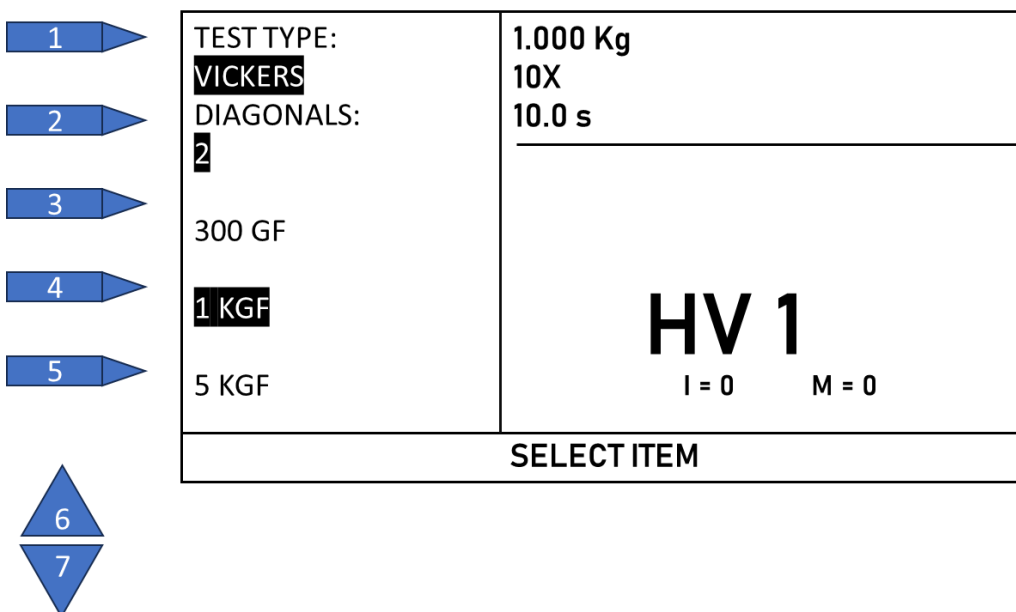


Figure 7: Scale submenu

The values marked in black indicate the current selections. Different forces can be chosen by using buttons 3, 4 and 5. By pressing button 7, more force options become available. Choose the desired force by pressing the corresponding button, press OK and return to the homepage.

2.2.3 Dwell time

To adjust the dwell or force-application time, press button 1 to access the menu. Press button 5 to open the 'test times' submenu. This submenu is shown in Figure 8.

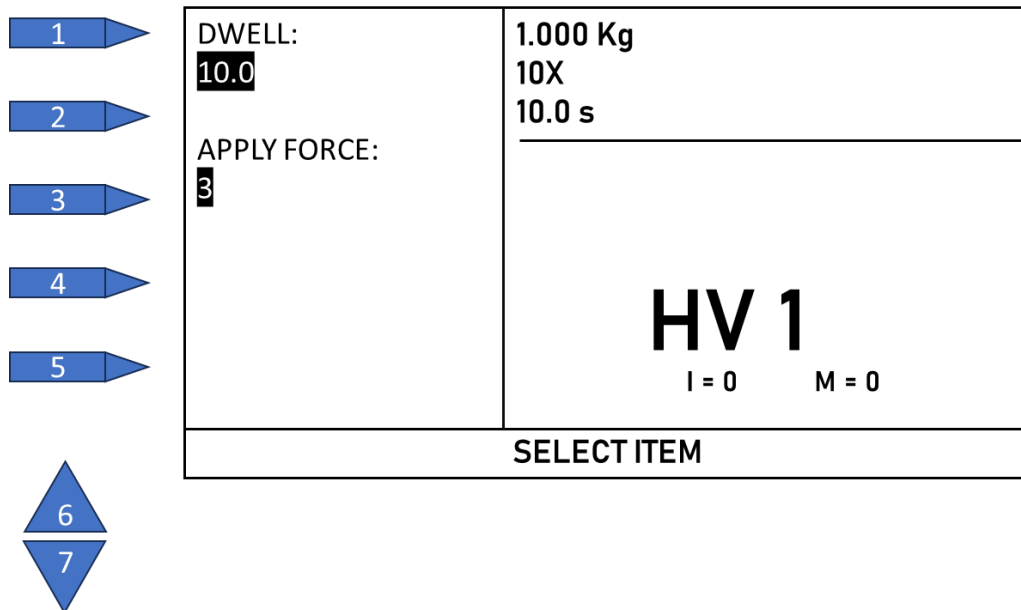


Figure 8: Test times submenu

Select the dwell time by pressing button 1 or the force application time by pressing button 2. A new value can be entered using the numpad and confirmed by pressing OK.

3 User interface

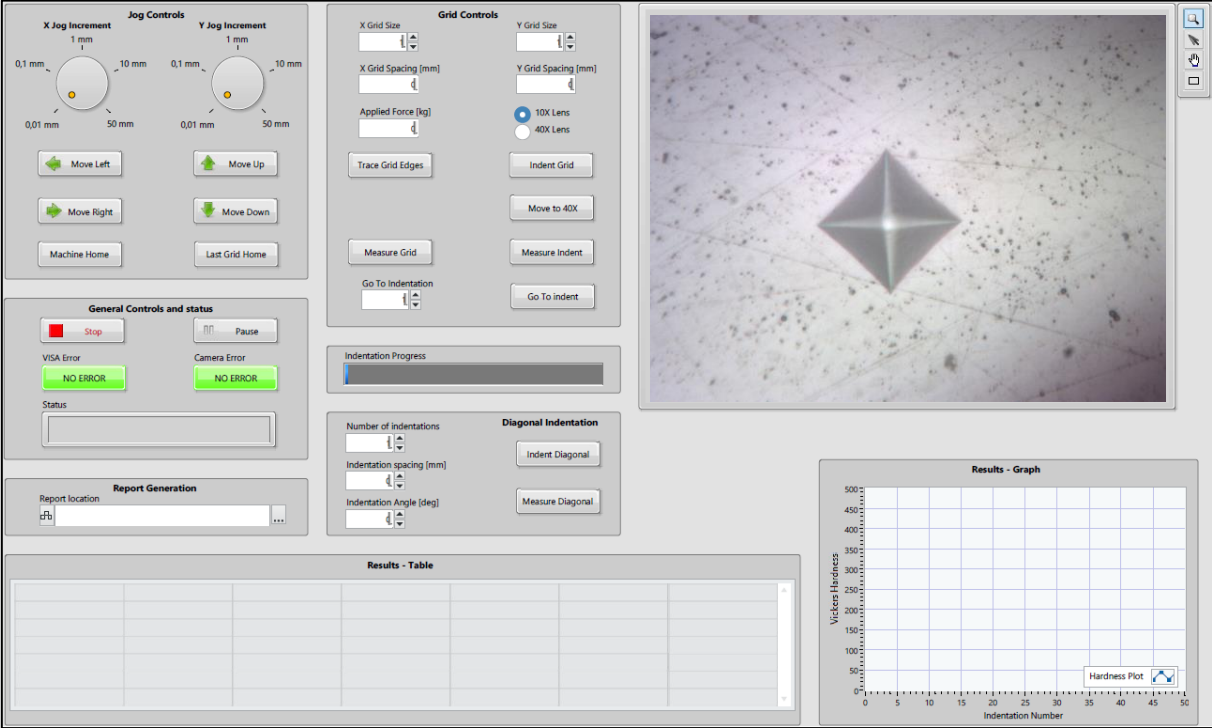


Figure 9: User interface

3.1 Program start

The 'Hardness mapper' software used to control the hardness tester is located in the PC's program files. A file named 'Hardnessmapper' houses the executable program. A shortcut is also provided on the PC's desktop. Initiating the program will initialize the controller and camera, preparing them for operation.

3.2 General controls and status

This section of the user interface contains the general operation and status of the hardness tester. It includes a **stop** button, used to halt the program after the measurement process completes or to stop the program if an error occurs. The **pause** button will interrupt the indentation or measurement process. The state of communication with the Arduino and camera are also displayed here. The green box of the respective component will turn red when an error occurs.

Furthermore, the **general status** of the hardness tester and its processes are displayed here. The status indicates whether the Arduino is initialized, the current processes, possible errors that occur and so on. A summary of the different statuses is included in Table 1.

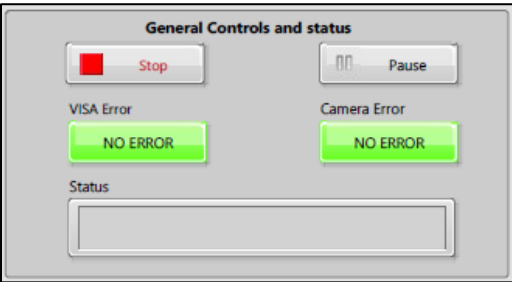


Figure 10: General controls and status

3.3 Jog controls

In order to manually control the XY-stage, the user interface is equipped with jog-controls. This allows the user to move the XY-stage in its four directions using the distance selector knobs and the corresponding buttons.

The **machine home** button will return the XY-stage to its base position. When a limit switch is triggered, pressing this button will return the XY-stage to its working range.

The **last grid home** button resets the XY-stage to the first indentation of the most recent indentation pattern. If the XY-stage has been moved after creating an indentation pattern, pressing this button will return it to the first indentation of the latest pattern.



Figure 11: Jog controls

3.4 Grid indentation controls

The grid controls section, shown in Figure 12, contains all functions for creating and measuring grid-shaped indentation patterns. A grid pattern with multiple rows and columns can be chosen, but also a single row or column is possible.

The **grid-size fields** for both the X and Y directions indicate how many indentations are made in the respective direction. The **grid-spacing** indicates the spacing between indentations. It is perfectly possible to enter different values for both the size and spacing of the grid in different directions.

The **applied force** field is required to calculate the hardness along with the measured indentation. Enter the value of the applied force that is set in the hardness tester control panel.

A **lens selector switch** is present to inform the software which lens is currently selected. The choice of lens is determined based on the size of the indentations.

The **trace grid edges** button will traverse the edges of the set indentation pattern. This function can be used to verify the positioning of the proposed indentation pattern. The operator can visually check that the indentations will be made in the required place, and that the XY-stage does not reach its limits.

The **indent grid** button will start the process of creating the set indentation pattern.

The **move to 40X** button will center the indentation in the image when using the 40X magnification lens.

The **measure grid** button will start the measurement process for measuring the most recent indentation pattern. In addition to this, the **measure indent** button is provided when only the current indentation in view needs to be measured.

The field and **go to indent** button are present. When the measurement process is complete and a number of indentations are to be checked for further inspection, these can be used to navigate to a requested indentation.

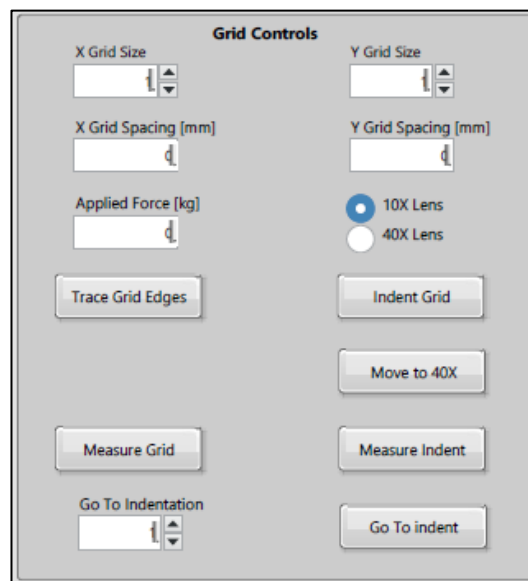


Figure 12: Grid controls

3.5 Diagonal indentation controls

The **number of indentations** and **indentation spacing** fields determine the number of indentations and their spacing. The **indentation angle** field determines the angle at which this line is made. This section is also provided with buttons for creating and measuring the diagonal indentation pattern, as shown in Figure 13.

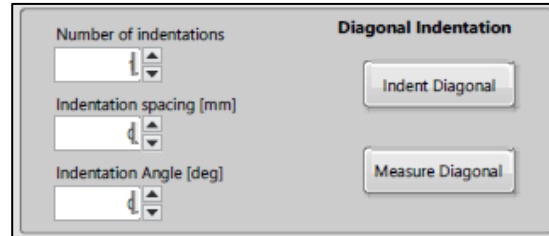


Figure 13: Diagonal indentation controls

3.6 Report generation

The results of each measurement are presented in a separate standardized report. The report contains various measurement values, including the number of the indentation, the force applied, the hardness, the dimensions of the indentation and its location. The title of the file shows the type of measurement, being a single measurement, a grid or a diagonal.

The location of the generated file can be changed in the field provided for this purpose. The default location is the PC's desktop.

4 Measuring hardness

The following paragraphs will provide a step-by-step guide for carrying out the main actions of the automated hardness tester. The explanation assumes an operational hardness tester prepared for indentation, along with an active computer program. The control screen on the hardness tester will indicate 'Ready for ind or meas' and the user interface will indicate 'controller ready'.

4.1 Single indentation

There are two methods to make a single indentation. Either through the user interface or by using the button on the hardness tester's 'indenter and lens control panel', depicted in Figure 3.

Step 1: When using the user interface, verify that the indentation will be made in the desired location by inspecting the placement using the 10X lens. The indentation will be made in the center of this image. Make sure the indentation is in focus by using the focus controls. Since only one indentation will be made, the XY-stage will not move.

Step 2: To make a single indentation using the user interface, set the X and Y grid size to 1 with a grid spacing of 0. When selecting 'indent grid', only one indentation will be made. A single indentation can also be made by pressing the 'start indent' button on the 'indenter and lens control panel'. This button is labelled with number 5 in Figure 3. Make sure the indenter is selected as the current tool before starting the indentation.

Step 3: Using the lens control panel, select either the 10X or 40X lens in order to measure the indentation. This choice is based on the size of the indentation. If the indentation doesn't fit the image, the measurement will fail. Make sure the indentation is centered in the image. This will largely be the case when using the 10X lens, only minor adjustments should be necessary. In order to get the indentation in frame when using the 40X lens, press the 'move to 40X' button.

Step 4: Tell the user interface what lens will be used to measure the indentation. This is done using the radio buttons denoted 10X or 40X. Fill in what force was used to make the indentations in the 'Applied force' field. This will be required for calculation the material hardness.

Step 5: With the indentation in focus and in the center of the image, press 'measure indent'. This will measure the current indentation visible on screen. The 'measure grid' button with a grid size of 1 can also be used here but the title of the generated will not indicate the correct type of measurement.

4.2 Grid / Linear indentations

Step 1: Bring the specimen in focus using the 10X lens. When switching to the 40X lens for measurement after the indentation process, the specimen should remain relatively in focus, thanks to the parfocality setting. Having the specimen in focus reduces the time required for indentation, as the hardness now knows the distance to the part, allowing the initial downward movement to be sped up.

Step 2: Specify the desired grid dimension in the user interface by filling in the X and Y grid size fields, along with the grid spacing fields.

Step 3: Press the 'trace grid edges' button to visually inspect the placement of the grid. This will also check whether the XY-stage will remain within its working limits or not.

Step 4: When the grid placement is as expected, switch from the lens to the indenter. When the indenter is the active tool, press the 'indent grid button'.

Step 5: Wait for the indentation process to finish and for the XY-stage to return to the first indentation.

Step 6: Using the lens control panel, select either the 10X or 40X lens in order to measure the indentation. This choice is based on the size of the indentation. If the indentation does not fit the image, the measurement will fail. Make sure the indentation is centered in the image. This will largely be the case when using the 10X lens, only minor adjustments should be necessary. In order to get the indentation in frame when using the 40X lens, press the 'move to 40X' button.

Step 7: Verify that the first indentation is centered in the image and in focus. Tell the user interface what lens will be used to measure the indentation. This is done using the radio buttons denoted 10X or 40X. Fill in what force was used to make the indentations in the 'Applied force' field. This will be required for calculation the material hardness.

Step 8: Once the appropriate lens is selected, the first indentation is centered and in focus, the chosen lens is indicated in the user interface, and the applied force is entered in its corresponding field, proceed by pressing the 'measure grid' button.

Step 9 (optional): Adjust the focus during the measurement process by using the scroll wheel of the specimen is not completely flat.

Once the measurement process is finished, a rapport will be generated and saved at the allocated location.

4.3 Diagonal indentations

Step 1: Bring the specimen in focus using the 10X lens. When switching to the 40X lens for measurement after the indentation process, the specimen should remain relatively in focus, thanks to the parfocality setting. Having the specimen in focus reduces the time required for indentation, as the hardness tester already knows the distance to the part, allowing the initial downward movement to be sped up.

Step 2: Define the desired dimensions for the diagonal indentation pattern by specifying the number of indentations, the indentation spacing, and the angle in the respective fields. Please note that the specified indentation spacing represents the diagonal distance between two indentations.

Step 3: Select the indenter and click 'indent diagonal'.

Step 4: Wait for the indentation process to finish and for the XY-stage to return to the first indentation.

Step 5: Using the lens control panel, select either the 10X or 40X lens in order to measure the indentation. This choice is based on the size of the indentation. If the indentation does not fit the image, the measurement will fail. Make sure the indentation is centered in the image. This will largely be the case when using the 10X lens, only minor adjustments should be necessary. In order to get the indentation in frame when using the 40X lens, press the 'move to 40X' button.

Step 6: Verify that the first indentation is centered in the image and in focus. Tell the user interface what lens will be used to measure the indentation. This is done using the radio buttons denoted 10X or 40X. Fill in what force was used to make the indentations in the 'Applied force' field. This will be required for calculation the material hardness.

Step 7: Once the appropriate lens is selected, the first indentation is centered and in focus, the chosen lens is indicated in the user interface, and the applied force is entered in its corresponding field, proceed by pressing the 'measure diagonal' button.

Step 8 (optional): Adjust the focus during the measurement process by using the scroll wheel of the specimen is not completely flat.

Once the measurement process is finished, a rapport will be generated and saved at the allocated location.

5 Status overview

Table 1: Hardness tester status overview

| Status | Comment |
|---------------------------------|--|
| Controller ready | The controller (Arduino) is ready and serial communication is started. |
| X limit triggered | The XY-stage reached its X-axis limit. |
| Y limit triggered | The XY-stage reached its Y-axis limit. |
| Homing X | The XY-stage is moving towards its X-axis home position. |
| Homing Y | The XY-stage is moving towards its Y-axis home position. |
| Home | The XY-stage has reached its home position. |
| Indenting grid | The hardness tester is starting the grid indentation process. |
| Indenting | The hardness tester is making an indentation. |
| Indentation grid ready | The indentation grid is ready, and the XY-stage has returned to the first indentation. |
| Marking grid edges | The XY-stage is tracing the edges of the soon to be placed indentation grid. |
| Measuring indentation(s) | The hardness tester is starting the indentation measurement process. |
| Measuring | The hardness tester is busy measuring an indentation. |
| Grid measurement ready | The hardness tester is done measuring the grid indentation pattern. |
| No grid home available | Could not return to the last grid home, because no grid was made. |
| Moving to specified indentation | The XY-stage is moving to the location of the specified indentation. |
| Indenting diagonal | The hardness tester is starting the diagonal indentation process. |
| Diagonal indentation ready | The indentations are ready, and the XY-stage has returned to the first indentation. |
| Measuring diagonal | The hardness tester is measuring the diagonal indentations. |
| Diagonal measurement ready | The hardness tester is finished measuring the diagonal indentations. |

6 Error handling

6.1 Lens not selected when starting multiple indentations.

When initiating an indentation without the indenter selected, the hardness tester will automatically switch to the correct indenter. Due to the time required for this switching process, there is a possibility that the XY-stage may assume the indentation is already completed and move to the next spot, resulting in an incorrectly placed grid pattern.

The indentation process can be stopped by clicking the stop button on the user interface. To stop the current indentation, press the 'stop indentation' button on the hardness tester control panel. This button is denoted with number 3 in Figure 3.

Move The XY-stage back to its intended original position and restart the indentation process with the indenter selected from the start.

Notes