Center of Maritime Technologies e.V.

Nr. 21/2013

CMT-Bericht zum Forschungsvorhaben

Entwicklung eines Verfahrens zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen im Blechzuschnitt

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

ALLIANZ
INDUSTRIE
FORSCHUNG

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

CMT-Bericht Nr. 21/2013

Entwicklung eines Verfahrens zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen im Blechzuschnitt

von

Martin-Christoph Wanner, André Harmel

Universität Rostock

Institut für Fertigungstechnik

Center of Maritime Technologies e.V.

Bramfelder Straße 164, 22305 Hamburg

Tel.: +49 (0)40 / 69 20 876-0

Fax: +49 (0)40 / 69 20 876-66

igf@cmt-net.org

© Copyright by Center of Maritime Technologies e.V. (CMT) - Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck, Vervielfältigung und Aufzeichnung auf Ton- und Bildträger, auch auszugsweise sind nicht ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers gestattet.
Rechtsbrüche werden strafrechtlich verfolgt.

Das IGF-Vorhaben

Entwicklung eines Verfahrens zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen im Blechzuschnitt

(FKZ 16764 N)

der Forschungsvereinigung Center of Maritime Technologies e.V. (CMT) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der nachstehende Bericht fasst Zielsetzung und wichtigste Ergebnisse des Forschungsprojektes zusammen.

Zusammenfassung

Die immer weiter steigenden Erwartungen an die Wirtschaftlichkeit der gesamten stahlbaulichen Fertigung von Großstrukturen im Schiffbau erfordern eine gezielte Betrachtung der einzelnen Fertigungsbereiche. Im Bereich des Blechzuschnittes ist der wichtigste Punkt zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit die Reduktion der sehr hohen Nebenzeiten. Eine wesentliche Rolle spielt dabei das Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen und Resten nach dem automatischen NC-gesteuerten Brennzuschnitt.

Nach dem aktuellen Stand der Technik wird der Sortierprozess durch einen Mitarbeiter manuell gesteuert. Trotz der technischen Unterstützung durch Krananlagen und Magnet-traversen gestaltet sich die manuelle Blechsortierung sehr zeitaufwendig. Aufgrund der Vielzahl an Blechen bei einem Schiff, besteht ein großer Bedarf nach einer Lösung zur automatischen Blechsortierung.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, ein Verfahren zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen im Blechzuschnitt zu entwickeln. Als Grundlage dienen einerseits die NC-Daten des Brennplans und andererseits die speziellen Anforderungen des jeweiligen Anwenderbetriebes.

Für die Entwicklung eines solchen Verfahrens wurde zunächst der Stand der Technik des Prozesses, sowie der dafür verfügbaren Werkzeuge analysiert. Darauf aufbauend wurden drei Anlagenkonzepte für die automatische Blechsortierung entwickelt und untersucht. Durchgesetzt hat sich dabei ein Konzept, bei dem kleine Bauteile bis 17kg manuell, mittlere Teile mit einer neuartigen flexiblen Magnettraverse und große Teile mit vorhandenen Großtraversen gehandhabt werden sollen. Die in diesem Vorhaben entwickelte Traverse zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Magneten einzeln schaltbar und mit Hilfe von Linearachsen zusätzlich einzeln positionierbar sind. Die Bauteilidentifikation und -lokalisierung erfolgt durch Auswertung der Brenn- und Markierdaten mit einem im Vorhaben entwickelten Software-Werkzeug. Diese Software steuert den kompletten Abräum- und Vereinzelungsprozess. Für den praktischen Nachweis der Funktionalität einer solchen Traverse wurde ein Funktionsmuster gebaut und an ihm die Funktionstüchtigkeit der Hard- und Software getestet.

Auf Grundlage dieses Versuchstandes konnte gezeigt werden, dass das automatische Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen nach dem Brennzuschnitt bis zu einem gewissen Automatisierungsgrad wirtschaftlich möglich ist.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Abstract

Constantly rising expectations in economy of entire large structures fabrication in shipbuilding industry require a specific consideration of the individual production areas. In the area of sheet metal cutting, the main goal to increase the economic efficiency is to reduce the very high post processing time. The key role is played by the clearing and separating of parts and residues after the automatic NC controlled flame cutting.

According to the current state of the art, the process of sorting is manually controlled by an worker. Despite the technical support by crane systems and magnet-traverses, manual sheet metal sorting is highly time consuming. Due to the variety of plates for a ship construction, there is a significant need for a solution with automatic sheet metal sorting.

The objective of this research project was to develop one method for the automatic clearing and for the separation of components after the sheet metal cutting process. The NC data of the flame cutting plan on the one hand and the specific requirements of each company on the other, will serve as a basis for this method.

For the development of such a method, the State of the art of the process, as well as the available tools was first analyzed. Based on these three concepts for the automatic sorting sheet were developed and examined. A concept, at which small components, less than 17kg, shall be handled manually, middle size parts with a new flexible magnet-traverse and finally large parts with available big traverses, has prevailed against the other concepts. The traverse, developed in this project, is characterized by the fact that their magnets are individually switchable and additional individually adjustable using linear axes. The identification and localization of the parts are performed through evaluation of cutting and marking data with a software tool developed in the research project. This software controls the complete process of clearing and separating parts and wastes. For the practical proof of the functionality of such a traverse a prototype with two magnets was built up to test the proper functioning of the hardware and software.

Based on this test station it could be proven that automatic clearing and separating of components after sheet metal cutting is economically beneficial, to a certain level of automation.

The objective of the project has been achieved.

Projektbegleitender Ausschuss:

Nordic Yards Wismar GmbH
Herr Karl

IMG mbH
Herr Bockholt

Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH & Co. KG
Herr Heinemann

Ostseestaal GmbH
Herr Schellhorn

Imawis GmbH
Herr Dr. Lemke

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ..... **I**

Abstract ..... **II**

Inhaltsverzeichnis ..... **IV**

Abbildungsverzeichnis ..... **VI**

Tabellenverzeichnis ..... **VIII**

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung 1

1.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens 2

1.2.1 Entwicklung und Untersuchung von Anlagenkonzepten 3

1.2.2 Entwicklung einer Traverse für Aufnahme und Transport der Bauteile 3

1.2.3 Entwicklung einer Software zur Lokalisierung, Aufnahme, Vereinzelung und zum Ablegen der Bauteile und Reste 4

1.3 Innovativer Betrag der angestrebten Forschungsergebnisse 4

2 Stand der Technik **5**

2.1 Derzeitiger Sortierprozess 5

2.2 Nutzbare Daten an der Arbeitsstation 6

2.3 Komponenten der neuen Magnettraverse 6

2.3.1 Antrieb der Achsen 6

2.3.2 Greiferkonzepte 7

3 Entwicklung und Untersuchung von Anlagenkonzepten **13**

3.1 Systematisierung der Anforderungen 13

3.2 Verschiedene Anlagenkonzepte 17

3.2.1 A – Magnettraverse mit starren einzeln ansteuerbaren Magneten 17

3.2.2 B – Handhabungsroboter zum Sortieren kleiner und mittlerer Bleche 19

3.2.3 C – Flexible Traverse zum Handhaben kleiner und mittlerer Bleche 19

4 Software zur Bauteillokalisation und Bewegungsplanung **22**

4.1 Anforderungen an die Software 22

4.2 Methodendokumentation 23

4.2.1 Aufbau der Brenndateien (ESSI-Format) 23

4.2.2 Diskrete Darstellung beliebiger Konturen 24

4.2.3 Prüfen und Füllen der Konturen ... 26
4.2.4 Objektunterscheidung und Verschachtelung ... 28
4.2.5 Zuordnung der Objektbezeichnungen ... 28
4.2.6 Massenberechnung ... 29
4.2.7 Flächenschwerpunktberechnung ... 30
4.2.8 Magnetverteilung je Bauteil ... 32
4.2.9 Ermittlung der zu erfassenden Teile je Hub ... 33
4.2.10 Positionsfindung der Magnettraverse ... 34
4.2.11 Bewegungsplanung und Ansteuerung der gesamten Traverse ... 35
4.3 Benutzerdokumentation ... 37
4.3.1 Startfenster ... 37
4.3.2 Eingabefenster ... 38
4.3.3 Ergebnisfenster ... 40

5 Entwicklung Versuchsstand ... 42
5.1 Funktionsmuster der flexiblen Magnettraverse ... 42
5.1.1 Aluminium-Rahmen und linear Achsen ... 42
5.1.2 Antriebs- und Steuerungstechnik ... 43
5.1.3 Elektromagnete ... 44
5.2 Aufbau des Versuchsstandes ... 45
5.3 Exemplarische Sortierversuche ... 46
5.3.1 Musterblech ... 47
5.3.2 Versuchsergebnisse ... 48

6 Zusammenfassung und Ausblick ... 53

Literaturverzeichnis ... 56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Magnetkran zur Be- und Entladung von Brennstationen, [2] 1
Abbildung 1.2: Sortierung kleiner Bauteile 2
Abbildung 1.3: Angestrebte Forschungsergebnisse 3
Abbildung 2.1: Sortierbereich 5
Abbildung 2.2: Greifklemmen der Firma Lange-Hebetechnik e. K., [6] 8
Abbildung 2.3: Saugspinne SSP-SG, [7] 9
Abbildung 2.4: Permanentmagnete der Firma MT Industry, [8] 10
Abbildung 2.5: Batteriemagnet der Firma MT Industry, [8] 11
Abbildung 2.6: Haftmagnet-Systeme mit erreichbare Haftkrafterhöhungen, nach [10] 12
Abbildung 2.7: Abhängigkeit der Haftkraft von der Oberflächengüte, nach [10] 12
Abbildung 3.1: Häufigkeitsverteilung der Bauteilmassen des 2800 TEU Containerschiffes . 14
Abbildung 3.2: Brute-Force-Algorithmus für Ermittlung des Magnetdurchmessers 16
Abbildung 3.3: Starre Anordnung der Magnete bei Konzept A 17
Abbildung 3.4: Empfohlener Randabstand beim Heben mit mehreren Magneten, [12] 18
Abbildung 3.5: Anlagenkonzept B mit Roboterportal 19
Abbildung 3.6: Anlagenkonzept C mit flexibler Traverse 20
Abbildung 3.7: Flexible Magnettraverse beim Abräumen des Brenntisches in drei Hüben .. 20
Abbildung 4.1: Darstellung einer Gerade nach Zeichnung mit Bresenham-Algorithmus 25
Abbildung 4.2: Darstellung einer Kurve nach Zeichnung mit Bresenham-Algorithmus 25
Abbildung 4.3: Darstellung der diskretisierten Kontur eines Brennbildes 26
Abbildung 4.4: Zu prüfende Nachbarpixel beim Füllen einer Kontur 27
Abbildung 4.5: Diskrete Abbildung der ausgefüllten Flächen 27
Abbildung 4.6: Diskrete Abbildung der Bleche 28
Abbildung 4.7: Fehler in der Flächenberechnung 30
Abbildung 4.8: Flächenschwerpunkt eines Pixels 31
Abbildung 4.9: Lage eines Pixels 31
Abbildung 4.10: Einteilung der Traverse in vier Quadranten 34
Abbildung 4.11: Kommentierte Startfenster der BleSo-Steuerung 37
Abbildung 4.12: Kommentiertes Eingabefenster der BleSo-Steuerung 38
Abbildung 4.13: Darstellung einer Magnetreihe mit zwei Magneten 39
Abbildung 4.14: Lage des Brennbereiches im Arbeitsbereich 39
Abbildung 4.15: Kommentiertes rechtes Ergebnisfenster 40
Abbildung 4.16: Kommentiertes linkes Ergebnisfenster 41
Abbildung 5.1: CAD-Modell des Funktionsmusters 42
Abbildung 5.2: Motoren und Steuergerät der Firma Jenaer Antriebstechnik GmbH, [13] 43

Abbildung 5.3: Elektromagnet des Funktionsmusters 44
Abbildung 5.4: Federnde Anbringung der Magnete 44
Abbildung 5.5: Versuchsstand im Versuchsfeld der Forschungseinrichtung 45
Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Verknüpfung der Anlagenkomponenten 46
Abbildung 5.7: Musterblech der Firma Ostseestaal GmbH 47
Abbildung 5.8: Erkannte Bauteile des Musterbleches 48
Abbildung 5.9: Fehler beim Einlesen der Konturen 48
Abbildung 5.10: Reihenfolge des Abräumens und Zuordnung der Ablagefächer 51
Abbildung 5.11: Abräumen des exemplarischen Brennbildes 52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Maschinensteuerprogramm-Formate 6
Tabelle 3.1: Faktoren für die Berechnung der zulässigen Körperkraft 15
Tabelle 3.2: Bauteilhäufigkeitsverteilung nach Gewichtsgrenzen der neuartigen Traverse . 15
Tabelle 3.3: Kostenvergleich zwischen starrer und flexibler Traverse 21
Tabelle 4.1: Beispiel für einen Dateikopf einer Brenndatei 23
Tabelle 4.2: Beispiel für einen Fahrbefehl im ESSI-Format 24
Tabelle 4.3: Beispiel für einen Brennbefehl im ESSI-Format 24
Tabelle 5.1: Anforderungen an das Musterblech 47
Tabelle 5.2: Erhaltene Bauteil-Daten aus Brenn- und Markierdatei 49
Tabelle 5.3: Vergleich der Bauteilmassen 50
Tabelle 5.4: Teileanzahl je Sektion 51
Tabelle 5.5: Teileanzahl je Leitweg 51

1 Einleitung

Die stahlbauliche Fertigung von Großstrukturen im Schiffbau gliedert sich in die Bereiche: Oberflächenvorbehandlung, Teilefertigung, Paneelfertigung, Teilsektions- bzw. Sektionsfertigung, Modulmontage, Beschichtung und Endmontage [1]. Das Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen und Resten im Blechzuschnitt gehört zur Teilefertigung und erfolgt nach dem automatischen NC-gesteuerten Brennzuschnitt. Dabei kommen in der Regel manuell bediente Portalkräne, welche mit Magnettraversen ausgestattet sind, zum Einsatz, siehe beispielhaft Abbildung 1.1. Die einzelnen Werften unterscheiden sich bezüglich ihrer aktuellen Ausstattung an den Brennstationen teilweise erheblich.

Abbildung 1.1: Magnetkran zur Be- und Entladung von Brennstationen, [2]

Die immer weiter steigenden Erwartungen an die Wirtschaftlichkeit des gesamten Fertigungsprozesses erfordern eine gezielte Betrachtung der einzelnen Bereiche. Für dieses Forschungsvorhaben ergibt sich daraus die nachfolgende Problemstellung.

1.1 Problemstellung

Der wichtigste Punkt zur Steigerung der Produktivität im Blechzuschnitt und der nachgelagerten Schweißanlagen ist eine Reduktion der vorhandenen, sehr hohen Nebenzeiten [3]. Momentan wird der Sortierprozess durch einen Mitarbeiter manuell gesteuert, indem z. B. Magnete durch Vorwahl der Magnetreihen und –spalten einzeln geschaltet werden. Das Problem der Teileaufnahme für zugeschnittene große Brenn- und Schrottteile in einem Arbeitsgang ist gelöst. Mit üblichen Magnettraversen unter Verwendung von Elektromagneten wie z. B. Demag R30 im Reihenabstand von 0,5m können Bauteile ab

etwa 400mm x 600mm sicher aufgenommen werden [4]. Die Positionierung des Hebewerkzeuges für das gezielte Aufnehmen zugeschnittener kleinerer Brenn- und Schrottteile ist dagegen problematisch und kostet sehr viel Zeit. Ebenso gestaltet sich das Ablegen an definierten Positionen auf den spezifischen Transportsystemen in dieser Kombination aus Traverse und Teilegröße schwierig, siehe Abbildung 1.2.

Abbildung 1.2: Sortierung kleiner Bauteile

Die Sortiervorschriften sind firmenspezifisch sehr unterschiedlich und der jeweiligen Infrastruktur und Organisation angepasst. Eine Möglichkeit, die über das Sortieren nach Größe und Gewicht hinausgeht, ist die Sortierung der Brennteile nach ihren Leitwegen[1].

1.2 Zielstellung des Forschungsvorhabens

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein System zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen nach dem Blechzuschnitt zu entwickeln. Grundlage für dieses flexible und firmenspezifisch adaptierbare System sind einerseits die NC-Daten des Brennplans und andererseits die speziellen Anforderungen des jeweiligen Anwenderbetriebes.

Die in dem Vorhaben angestrebten Forschungsergebnisse sind in Abbildung 1.3 dargestellt. Für das Erreichen des Forschungszieles sind Untersuchungen und Entwicklungen in drei Bereichen notwendig.

[1] Leitweg - Reihenfolge der Arbeitsstationen, welche ein Bauteil während des Fertigungsprozesses durchläuft

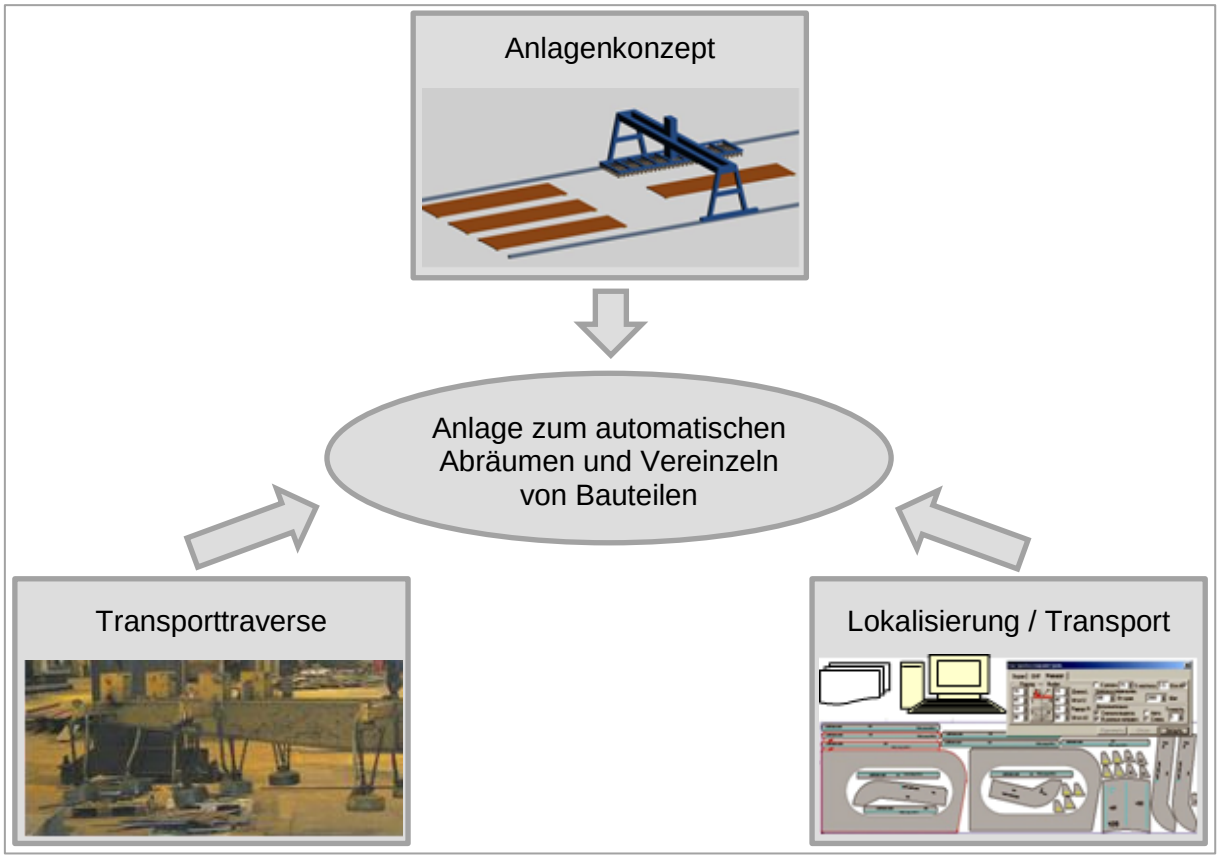

Abbildung 1.3: Angestrebte Forschungsergebnisse

1.2.1 Entwicklung und Untersuchung von Anlagenkonzepten

Angestrebt wird die Entwicklung und Erprobung eines neuen Verfahrens für das automatisierte Abräumen und Vereinzeln von Brenn- und Schrottteilen nach dem NC-Plattenzuschnitt. Dazu sollen verschiedene Anlagenkonzepte entwickelt und in einer Simulationsumgebung untersucht werden, einschließlich der Sortier- und Ablageverfahren. Diese Anlagenkonzepte sind technisch und wirtschaftlich zu bewerten.

1.2.2 Entwicklung einer Traverse für Aufnahme und Transport der Bauteile

Für die sichere Handhabung und Vereinzelung der Bauteile ist eine spezielle Magnettraverse zu entwickeln, die aus einer Matrix von durch ein übergeordnetes Rechnersystem automatisch einzeln ansteuerbaren Elektromagneten bestehen soll. Grundlage für das sichere Aufnehmen von kleinen Brennschnitten, ab etwa 200mm x 300mm und größer, ist die Verwendung kleiner Elektromagnete, deren Größe, Abstand und Tragkraft zu ermitteln ist. Weiterhin sollen alternative Greiferkonzepte wie Vakuumgreifer oder mechanische Klemmvorrichtungen bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten untersucht werden.

1.2.3 Entwicklung einer Software zur Lokalisierung, Aufnahme, Vereinzelung und zum Ablegen der Bauteile und Reste

Angestrebt wird die Entwicklung eines Software-Werkzeuges für die Identifikation und Lokalisation der Bauteile zur rechnerunterstützen Ansteuerung der Einzelmagnete sowie für die Berechnung der Sortierwege auf Basis der digital vorliegenden Daten aus dem Brennplan. Diese Software soll den kompletten Abräum- und Vereinzelungsprozess der zu automatisierenden Anlage steuern.

1.3 Innovativer Betrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Tendenz hin zur Unikatfertigung und zur Optimierung der Verschachtelungspläne in Richtung minimaler Verschnitte (Abkehr von der bisherigen Praxis, sektionsbezogener Blechzuschnitte), wird den Aufwand zur Sortierung der Bleche nach dem Zuschnitt weiter ansteigen lassen. Das derzeit praktizierte manuelle Vorsortieren ist ein Bruch in einem sonst weitgehend automatisierten Fertigungsfluss, obwohl alle für eine automatisierte Fertigung benötigten Daten bereits digital vorliegen.

Eine kostengünstige Fertigung ist zukünftig nur mit durchgängig automatisierten Verfahren, einschließlich der Blechsortierung, wirtschaftlich tragbar. Die Forschungsergebnisse leisten dazu die im Folgenden aufgezeigten innovativen Beiträge.

Der Sortieraufwand wird durch die Entwicklung einer ansteuerbaren Magnettraverse, die auch kleine Blechteile aufnehmen kann, in Kombination mit einem neuartigen Verfahren zur Bestimmung der Bauteile und Zuordnung des Sortierweges deutlich gesenkt. Durch die Vermeidung des Sortieraufwandes kann die Nutzungszeit des Brennzuschnitt-Arbeitsplatzes erhöht werden, da der Brenntisch mit dem geplanten Konzept mit einem Arbeitsschritt frei geräumt wird und damit den weiteren Brennzuschnitt nicht blockiert.

Durch eine gezielte und dokumentierte Sortierung im Blechzuschnitt sinkt der Sortieraufwand an den nachfolgenden Stationen (z. B. Mikropaneelfertigung).

Durch eine Modellierung, Simulation und Bewertung verschiedener Anlagenkonzepte wird die Grundlage für die Anpassung des entwickelten Sortierverfahrens an die unterschiedlichen spezifischen Anforderungen geschaffen und die Möglichkeit zur Anwendung in verwandten Bereichen aufgezeigt.

Als Ergebnis des Vorhabens wird ein automatisiertes und flexibles Verfahren zur Sortierung des Blechzuschnittes, in einem bisher nicht automatisierten Fertigungsabschnitt, geschaffen. Darauf aufbauend, kann eine neuartige Anlage konzipiert werden, bei der eine hohe Wirtschaftlichkeit sowie Vermeidung von schwerer körperlicher Arbeit erzielt werden kann.

2 Stand der Technik

Um Anforderungen an das zu entwickelnde Anlagenkonzept abzuleiten, musste zunächst der Stand der Technik analysiert werden. Das ermöglicht die Eingrenzung der Problemstellung sowie die Definition speziellerer Problemstellungen.

2.1 Derzeitiger Sortierprozess

Die manuelle Blechsortierung ist trotz der technischen Unterstützung durch Krananlagen und Magnettraversen sehr zeitaufwendig. Abhängig von der Ausstattung und dem Platzangebot auf den einzelnen Werften erfolgt der Sortierprozess direkt auf dem Brenntisch der NC-Maschine oder an einem separaten Sortierplatz. Mit Hilfe von Sortierportalen, je nach Werft mit unterschiedlicher Anzahl und Größe der Magneten, werden die Brennteile vereinzelt und sortiert. Zusätzlich werden an dieser Station weitere manuelle Prozesse vorgenommen. Dazu zählt hauptsächlich das manuelle Auftrennen von Brennbrücken zwischen einzelnen Brennteilen. Diese werden während des Brennvorganges verwendet, damit kleinere Brennteile nicht zwischen den Stegen des Brenntisches hindurch ins Wasser fallen. Die Sortiervorschriften sind firmenspezifisch unterschiedlich und der jeweiligen Infrastruktur und Organisation angepasst. Im einfachsten Fall sortiert der Werker die sektionsrein[2] gebrannten Teile mit der Magnettraverse nach der Größe. Auf einer anderen Werft werden die Teile mit Hilfe eines ausgedruckten Brennplanes nach Leitweg sortiert.

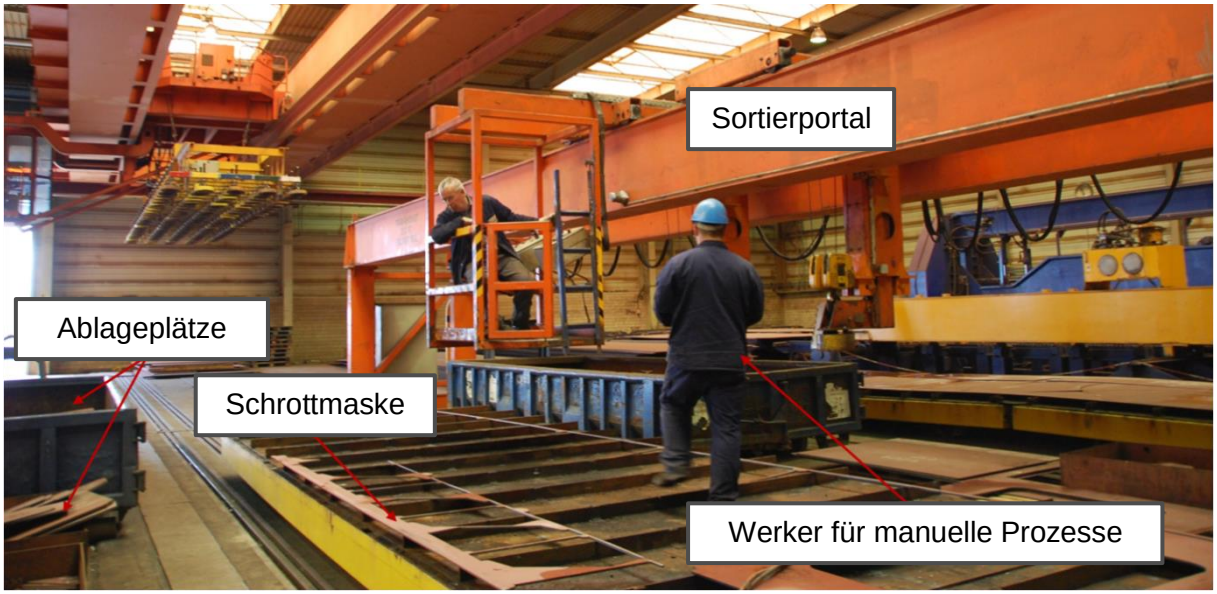

Abbildung 2.1: Sortierbereich

[2] sektionsrein = alle Brennteile, die auf dem Brenntisch liegen, werden in der gleichen Sektion verbaut

2.2 Nutzbare Daten an der Arbeitsstation

Alle Brennteile werden während des Zuschnittes oder an einer separaten Station markiert. Dafür liegen die Texte der Markierung in digitaler Form vor. Aus ihnen können Informationen über die Positionsnummer (Objekt + Sektion + Position) und/oder den Leitweg (nächste Arbeitsstationen nach dem Zuschnitt) gewonnen werden. Die Brenn-Dateien, welche von den NC-Maschinen verarbeitet werden, können in verschiedenen Formaten vorliegen. Zwei weit verbreitete Formate sind das ESSI- und das EIA-Format (G-Code). In der Tabelle 2.1 sind für beide Formate einige wichtige Befehle beispielhaft aufgelistet. Durch Auswertung der Brenn-Dateien kann unter anderem auf die Bauteilgrößen und die Bauteilgewichte geschlossen werden.

Tabelle 2.1: Maschinensteuerprogramm-Formate

Befehl	ESSI	EIA
Eilgang EIN	5	G05
Eilgang AUS	6	G06
Schneiden Ein	7	(M70)
Schneiden AUS	8	(M71)

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Möglichkeit besteht, mit Hilfe dieser Daten jede denkbare Sortiervorgabe durch einen automatischen Algorithmus nachzubilden.

2.3 Komponenten der neuen Magnettraverse

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird ein neuartiges Traversenkonzept entwickelt. Aufbauend auf diesem Konzept entsteht für Versuchszwecke ein Funktionsmuster einer solchen Traverse. In der Versuchshalle des Antragsstellers wird der Prototyp an einen Roboter, Kuka KR500L340, angeschlossen. Dadurch ergeben sich Anforderungen an das Gewicht und die Abmaße der Traverse, welche nicht denen auf einer Werft entsprechen. Das Funktionsmuster besitzt kleinere Abmaße und nur zwei Magnete. Im Folgenden werden die Untersuchungen zum Stand der Technik der einzelnen Komponenten der Traverse vorgestellt.

2.3.1 Antrieb der Achsen

Im endgültigen Traversenkonzept sind die Magnete auf Linearachsen befestigt. Für diese sind verschiedene Antriebsvarianten untersucht worden. Als Standardlösung stehen zwei Antriebssysteme, welche unterschiedliche Vor- und Nachteile besitzen, zur Verfügung.

Servomotor

Zum einen ist dies der Servomotor. Als Servomotoren werden elektrische Motoren verschiedener Bauart bezeichnet, die zusammen mit einem Servoregler als Servoantrieb bezeichnet werden. Diese Motoren werden in einem geschlossenen Regelkreis momenten-, geschwindigkeits- oder positionsgeregelt betrieben. Der im Motor vorhandene Sensor misst die Drehzahl des Motors sehr präzise. Diese Ist-Drehzahl wird nun von der Elektronik mit der Soll-Drehzahl verglichen und eine eventuelle Abweichung wird vom Servoregler ausgeregelt.

Schrittmotor

Ein Schrittmotor ist ein Synchronmotor, bei dem der Rotor bei geschickter Wahl der angesteuerten Statorspulen gezielt um einen konstanten Winkel gedreht werden kann. Auf diese Weise kann man in mehreren Schritten jeden Winkel, wenn er ein Vielfaches des konstanten Winkels ist, anfahren. Der Rotor eines Schrittmotors folgen im Prinzip exakt dem außen angelegten Feld und kann ohne Sensoren zur Positionsrückmeldung genau betrieben werden.

Vergleicht man beide Antriebssysteme miteinander, kommt man zu dem Schluss, dass die wirtschaftlichen Vorteile deutlich für den Schrittmotor sprechen, während vor allem Positioniersicherheit, hohes Drehmoment und hohe Drehzahlen die Entscheidung für den Servomotor begünstigen. Weiterhin können Schrittmotoren aufgrund der Ansteuerung einfacher betrieben werden als beispielsweise Servomotoren, welche auf die gewünschte Position eingeregelt werden müssen.

Der preisliche Vorteil gegenüber den teureren Servomotoren, sowie die einfachere Ansteuerung sind die ausschlaggebenden Argumente für die Verwendung von Schrittmotoren. Weiterhin zeichnen sich die hier aufgeführten Komponenten der Jenaer Antriebstechnik durch eine sehr leichte und kompakte Bauweise aus. Dies ist für das zu bauende Funktionsmuster besonders wichtig, da das Gesamtgewicht aufgrund von Traglastbegrenzungen eine wichtige Rolle spielt.

2.3.2 Greiferkonzepte

Die Industrie setzt für die automatische Handhabung von Flachmaterial zurzeit hauptsächlich drei unterschiedliche Systemlösungen ein. Diese Lösungen sind Lastaufnahmen mittels mechanischen Klemmvorrichtungen, Vakuumgreifer oder Magnete. Die Auswahl der passenden Lastaufnehmer ist dabei vorrangig von dem zu hebenden Material und der Verfahrbewegung abhängig. An zweiter Stelle stehen Faktoren wie der Energie- und Raumbedarf des Lastaufnahmemittels oder das Gewicht des zu hebenden Materials [5].

mechanische Klemmvorrichtungen

Mechanische Greifer finden im Rahmen von Automatisierungslösungen im Schiffbau so gut wie keine Verwendung. Sie werden hauptsächlich zum manuellen Transport von kleineren Einzelkomponenten eingesetzt. Hier ermöglichen sie als Greifklemmen, siehe Abbildung 2.2, den Werftarbeitern eine einfache, sichere und werkstoffunabhängige Materialaufnahme. Sie benötigen dabei keine externe Stromzufuhr, da ihre Haltewirkung rein auf einem mechanischen Kraftschluss basiert. Ihr geringes Gewicht und ihre schnelle und simple Montage ermöglichen dabei eine bedarfsabhängige Nutzung durch das mechanische Ankoppeln an bereits vorhandenen Hebeanlagen. Als großen Vorteil bieten mechanische Greifer die Möglichkeit mehrere auch nichtmagnetische Platten gleichzeitig zu transportieren.

Für eine automatiserte Lösung des Abräumprozesses sind diese mechanischen Klemmvorrichtungen, aufgrund der Notwendigkeit des manuellen Anbringens der Klemmen, nicht geeignet.

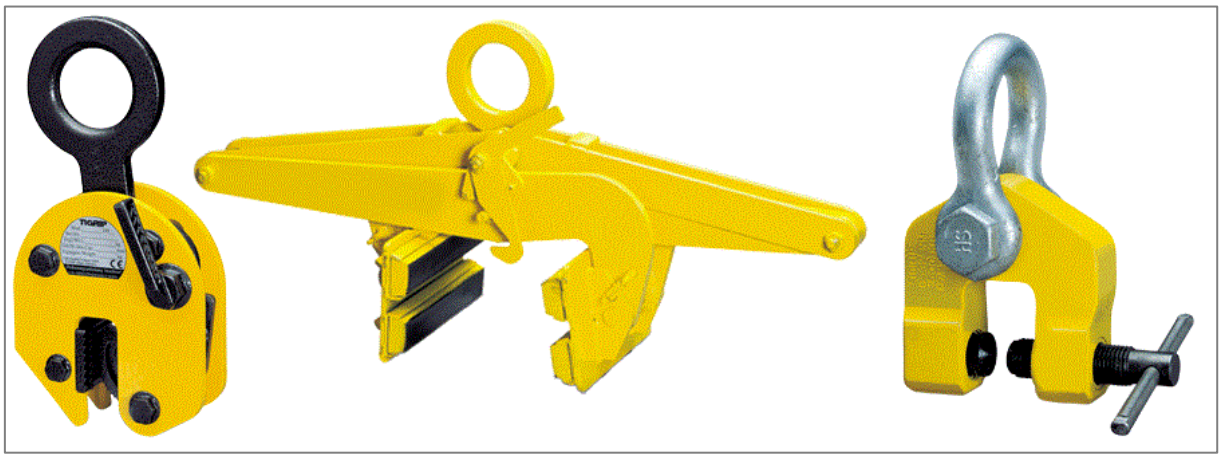

Abbildung 2.2: Greifklemmen der Firma Lange-Hebetechnik e. K., [6]

Vakuumsauggreifer

Vakuumsauggreifer unterscheiden sich prinzipiell nur in der Form und dem verwendeten Material. Form und Material sollte je nach Anwendung ausgewählt werden, um ein optimales Heben und einen geringen Verschleiß zu erzielen. Eine Vakuumsauganlage besteht neben den Saugglocken grundsätzlich aus einer Vakuumpumpe zur Erzeugung des Vakuums, Regelungselementen zum Einstellen und Halten der Systemparameter, sowie Überwachungselementen. Gegebenenfalls wird ein Vakuumvorratsbehälter für Sicherheitszwecke bei Verlust des Vakuums eingesetzt. Geschaltet werden die einzelnen Saugglocken durch das Freigeben und Sperren der Zuleitungen mittels Ventilen. Abbildung 2.3 zeigt beispielhaft die Anwendung einer Matrix von Vakuumgreifern in der Photovoltaik-Produktion.

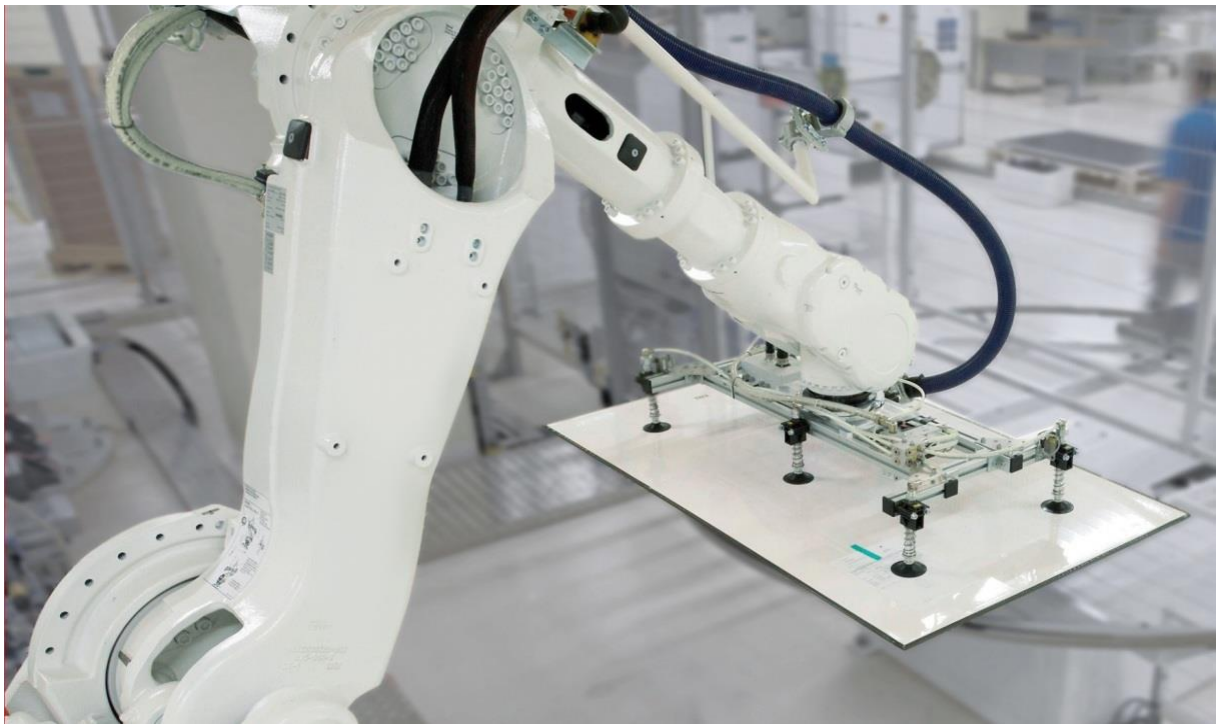

Abbildung 2.3: Saugspinne SSP-SG, [7]

Die Vorteile einer Vakuumanlage gegenüber Magnetgreifern sind das geringere Gewicht der Greifer sowie die Möglichkeit nichtmagnetische Bauteile heben zu können. Nachteilig ist die Tatsache, dass nur vollständig definierte Flächen einfach gehandhabt werden können. Denn bei mangelndem Verschluss einer Saugglocke kann kein ausreichendes Vakuum an den anderen Glocken des Systems aufgebracht werden. Hier wäre also eine Überwachung des Luftstroms nötig, um gezielt „undichte“ Saugglocken per Ventil einzeln zu sperren. Weitere Nachteile sind dadurch gegeben, dass an den Sauggreifern besonders unter erhöhten Temperaturen Verschleiß auftritt und dass mit Vakuumanlagen, im Gegensatz zu den anderen beiden Systemen, nicht mehrere übereinander befindliche Platten gleichzeitig gehoben werden können.

Magnete: Permanent-, Elektro- und Elektro-Permanentmagnete

Magnete als Lastaufnahmemittel können allgemein nach der Erzeugungsart des Magnetfeldes eingeteilt werden. Die Einteilung erfolgt in Permanent-, Elektro- und Elektro-Permanentmagnete.

Permanentmagneten sind dauerhaft magnetisch und benötigen daher nur ein Gehäuse das es ermöglicht, den Magneten in zwei verschieden Lagen zu drehen. Je nach Lage besitzt der Magnet einen der beiden Funktionszustände – magnetisch aktiv oder magnetisch inaktiv. Der Wechsel zwischen diesen Zuständen kann von Hand, pneumatisch oder auch elektrisch vollzogen werden, wobei die elektrische Variante am Markt nicht vorhanden ist. In der Abbildung 2.4 sind die am Markt erhältlichen Varianten dargestellt.

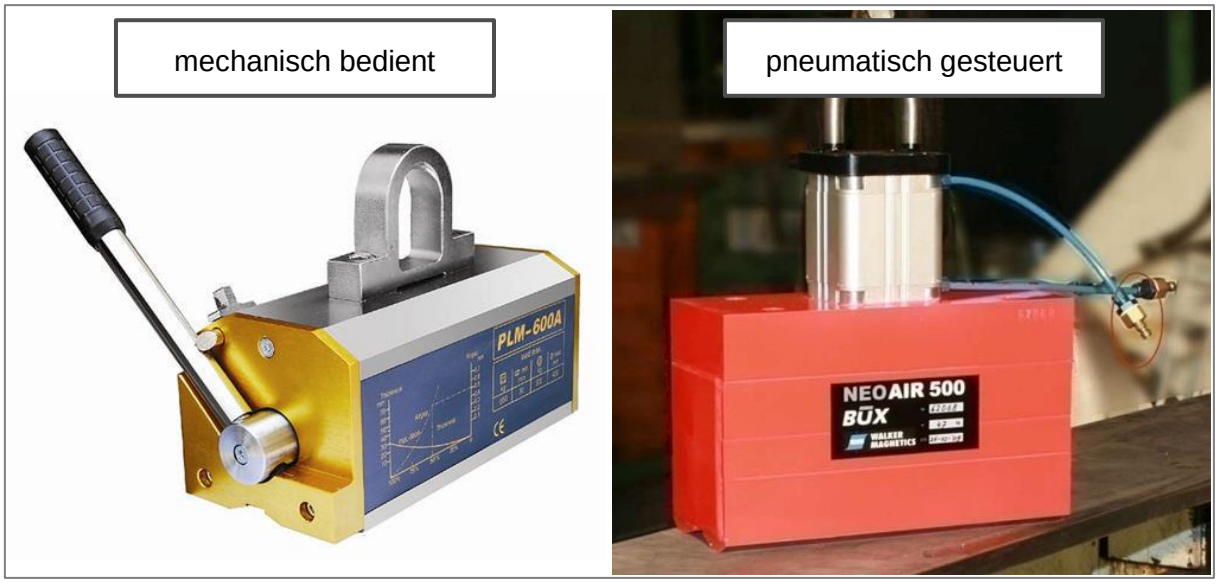

Abbildung 2.4: Permanentmagnete der Firma MT Industry, [8]

Permanentmagneten bieten den großen Vorteil, dass ihr Betrieb nur geringe Unterhaltskosten erfordert, da nur der Schaltvorgang an sich einer Energiezufuhr bedarf. Zwischen den Magneten müssen jedoch Sicherheitsabstände eingehalten werden, damit eine gegenseitige Beeinflussung und Entladung der Magneten ausgeschlossen wird.

Die Hubkraft je Volumen ist bei Permanentmagneten geringer als die von Elektromagneten und verliert zusätzlich an Stärke, wenn die Temperatur des zu hebenden Materials steigt. Außerdem müssen die Gehäuse aufgrund der zwei schaltbaren Magnetpositionen größer gebaut werden, was die Magnetkraftdichte noch weiter absenkt. Schlussendlich muss bei Permanentmagneten die Degeneration der Magneten berücksichtig werden, die über den zeitlichen Verlauf zu einer Abnahme der Hubkraft führen kann, falls ein zu geringer Sicherheitsabstand auftritt.

Elektromagnete erzeugen ihre Kraftwirkung hingegen auf Basis des Elektromagnetismus. Um dies zu erreichen, wird im Magnetgehäuse eine Spule eingebaut, die eine magnetische Kraft entwickelt, wenn sie von einem Strom durchflossen wird. Wird als Stromquelle eine interne Batterie verwendet, spricht man von Batteriemagneten, siehe Abbildung 2.5. Elektromagnete hingegen werden aus dem Netz versorgt. Die Vorteile dieser Bauarten sind die einfache aktiv/inaktiv Schaltung über das Anlegen einer elektrischen Spannung, die Realisierbarkeit von großen magnetischen Kräften und die Möglichkeit das gehobene Material nach dem Ablegen durch Umpolung der Spule wieder zu entmagnetisieren.

Abbildung 2.5: Batteriemagnet der Firma MT Industry, [8]

Ein Batteriemagnet ist somit ähnlich autark wie ein von Hand geschalteter Permanentmagnet. Sein Wirkungsgrad liegt aber aufgrund der Versorgung aus dem Akkumulator unter dem eines Elektromagnetes. Weiterhin ist er aufgrund der internen Batterie schwerer und ebenfalls größer als ein Elektromagnet mit vergleichbarer Hubkraft je Volumen.

Nachteilig ist bei beiden, dass im Fall einer zusammenbrechenden Versorgungsspannung die magnetische Hubkraft binnen Sekunden nicht mehr zur Verfügung steht und somit ein Halten der Last nicht mehr realisierbar ist. Diesem Umstand begegnet der Gesetzgeber über die Vorschrift einer zusätzlichen Sicherung mittels Batteriepuffer, falls der Magnet in einem nicht gesicherten Bereich Verwendung findet und die maximal ungesicherte Tonnage von 20kg überschritten wird [9]. Als letzter Punkt sollte erwähnt werden, dass für jeden Arbeitsvorgang Energie benötigt wird, was für hohe Betriebskosten sorgt.

Abschließend stellt der Elektro-Permanentmagnet eine Mischung aus Permanent- und Elektromagnet dar. Es handelt sich dabei nicht, wie es der Name vermuten lässt, um einen einfachen elektrisch geschalteten Permanentmagneten, sondern um einen bistabilen Permanentmagneten. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung kehrt dieser seine Magnetfeldrichtung um. Somit ist es möglich ohne physikalische Lageänderung des Magnetes seine Wirkungsrichtung zu ändern.

Für alle Magnettypen gilt, dass durch die Ausrichtung der Magnetlinien eine sehr große Verstärkung der magnetischen Kraft auf eine bestimmte Fläche erzielt werden kann. Dabei zeigt die Abbildung 2.6 einerseits einen offenen Magnetkern und andererseits einen Magnetkern der durch zwei Metallplatten begrenzt wird (Sandwichbauweise). Bei Verwendung des gleichen Magnetkerns besitzt die Sandwichvariante eine um den Faktor 18 größere magnetische Kraft als der offene Magnetkern.

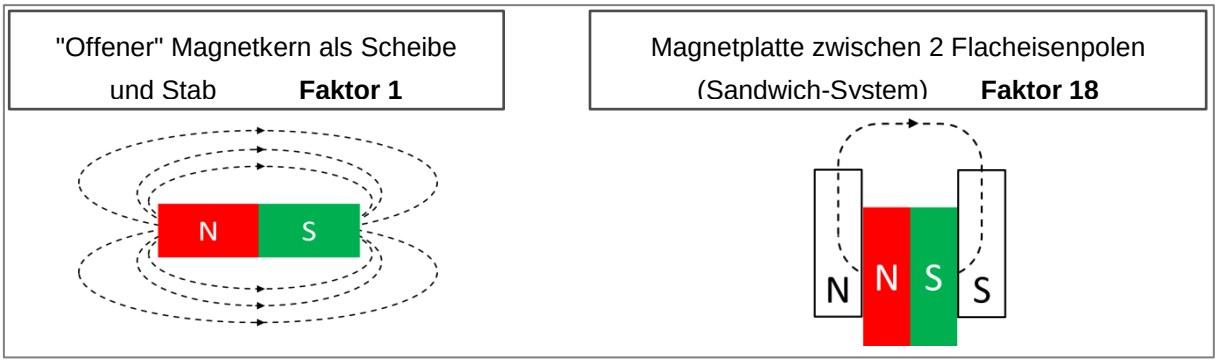

Abbildung 2.6: Haftmagnet-Systeme mit erreichbare Haftkrafterhöhungen, nach [10]

Darüber hinaus ist die Hubkraft neben dem Luftspalt zwischen Magnet und Material auch vom Material an sich abhängig. Der im Handelsschiffbau häufig verwendeten Stahl S235 besitzt einen sehr hohen Haftkraftparameter von 0,94 [10].

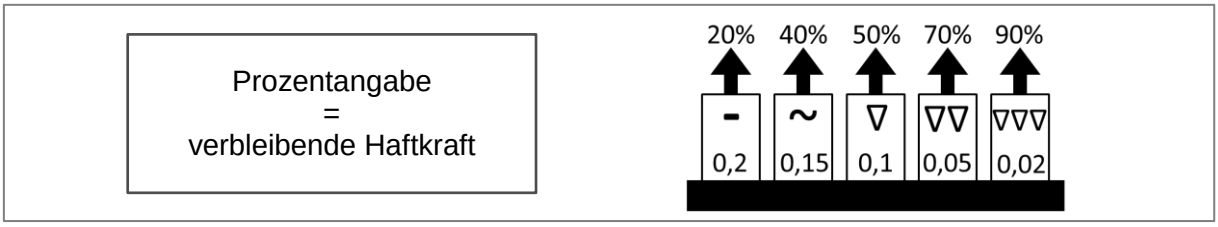

Abbildung 2.7: Abhängigkeit der Haftkraft von der Oberflächengüte, nach [10]

Neben diesen Einflüssen auf die Haftkraft gibt es weitere Zusammenhänge der Haftkraft zur Oberflächengüte und zu dem Verhältnis von Schubkraft zu Haftkraft. Die Abbildung 2.7 zeigt die umgesetzte Hebeleistung in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit des zu heben Materials. Geht man nun von einer rauen Oberfläche aus, wie sie im Schiffbau hauptsächlich zu finden ist, erkennt man, dass bei einer mittleren Rautiefe von 0,1µm die umgesetzte Leistung auf 50% sinkt.

Für das im Rahmen des Vorhabens entstandene Anlagenkonzept zeichnet sich die Verwendung eines Magnetgreifersystemes mit Elektromagneten als beste Lösung ab. Die mechanischen Greifersysteme scheiden aufgrund der nötigen manuellen Arretierung der Greifer als brauchbare Lösung aus. Ausschlaggebende Argumente für die Verwendung von Magneten sind die Vorteile in der Anwendung in Kombination mit Stahl im Vergleich zu Vakuumgreifersystemen. Gegenüber den Vakuumgreifer unterliegen die Magnete kaum Verschleiß und sorgen somit bei hoher Verfügbarkeit für geringe Wartungskosten. Weiterhin können Blechteile auch gegriffen werden, wenn die Magneten über die Blechkanten hinaus ragen, dies ist mit Vakuumgreifern nicht möglich. Die Verwendung von Elektromagneten setzt sich gegen die anderen Magnettypen durch, da hier die Abstände zwischen den einzelnen Magneten geringer ausfallen dürfen und somit die Verwendung von kleineren Magneten das Heben von Kleinteilen ermöglicht. Weiterhin bieten Elektromagnete die größten Kraftreserven beim Heben der vorliegenden Materialien.

3 Entwicklung und Untersuchung von Anlagenkonzepten

Eine an den automatischen Blechzuschnitt anschließende, ebenfalls automatisierte Bearbeitungsstation für das Abräumen und Sortieren von Blechteilen sollte sich in bestehende Anlagen nahtlos einfügen können. Dies erfordert ein flexibles Anlagenkonzept, welches an die spezifischen Anforderungen der Anwemder angepasst werden kann. Daher sind zunächst diese Anforderungen zu systematisieren. Darauf aufbauend sind dann Anlagenkonzepte zu entwickeln, zu modellieren und die verschiedenen Lösungen zu bewerten.

3.1 Systematisierung der Anforderungen

Fachgespräche mit Produktionsingenieuren verschiedener Schiffbaustandorte ergaben, dass für eine produktionsgerechte Auslegung der Blechsortierung zunächst eine Analyse der vorhandenen bzw. zukünftig erwarteten Produktionsstruktur durchgeführt werden sollte. Dies wurde im Rahmen des Projektes exemplarisch für die Brennteile eines gesamten Schiffes einer Werft durchgeführt. Damit die gewonnenen Ergebnisse möglichst allgemeingültigen Charakter haben, wurden die Daten eines Standardcontainerschiffes (2800 TEU), dessen Bauteilstruktur typisch für die an diesem Standort gefertigten Schiffe ist, gewählt.

Für die Systematisierung der Bauteile nach Gewichts- und Größenklassen waren alle 1724 Brennbilder des Containerschiffes auszuwerten. In die im Vorhaben entwickelte Software zur Auswertung der Brenndaten wurde ein Ausgabemodul integriert, welches für jedes Brennbild unter anderem die Eigenschaften:

- Plattenabmaße,
- Anzahl der Bauteile,
- Bauteilmassen und
- Bauteilabmaße

ermittelt. Mit dieser Software war es möglich, die Brenndaten des gesamten Schiffes automatisch auszuwerten und die benötigten Eigenschaften in eine Datenbank zu schreiben. Unter anderem ergibt sich aus dieser Datenbasis die Häufigkeitsverteilung der Bauteilmassen, siehe Abbildung 3.1. Das Ergebnis dieser Analyse zeigte, dass im Produktionsfeld mit einem sehr breiten Bauteilspektrum (2kg bis 12000kg) zu rechnen ist.

Die Entwicklung eines Werkzeuges, das in der Lage ist, das gesamte Bauteilspektrum abzudecken, ist praktisch nicht realisierbar. Der Grund dafür liegt darin, dass zum gezielten Erfassen kleiner Bauteile eine geringe Baugröße, für große Bauteile aber eine hohe Haftkraft

der Magnete notwendig ist. Möchte man beide Bedingungen mit dem Gerät abdecken, würde man eine Magnettraverse mit einer großen Anzahl kleiner Magnete benötigen. Des Weiteren würde eine große Traverse, mit Abmessungen für das Heben der Bauteile mit 12000kg, ähnlich schwer ausfallen wie die bereits auf den Werften existierenden Großtraversen. Somit gäbe es kaum Geschwindigkeitsvorteile beim Verfahren der Traverse. Daraus wurde abgeleitet, dass zum Handhaben aller Bauteile ein Gerätemix benötigt wird.

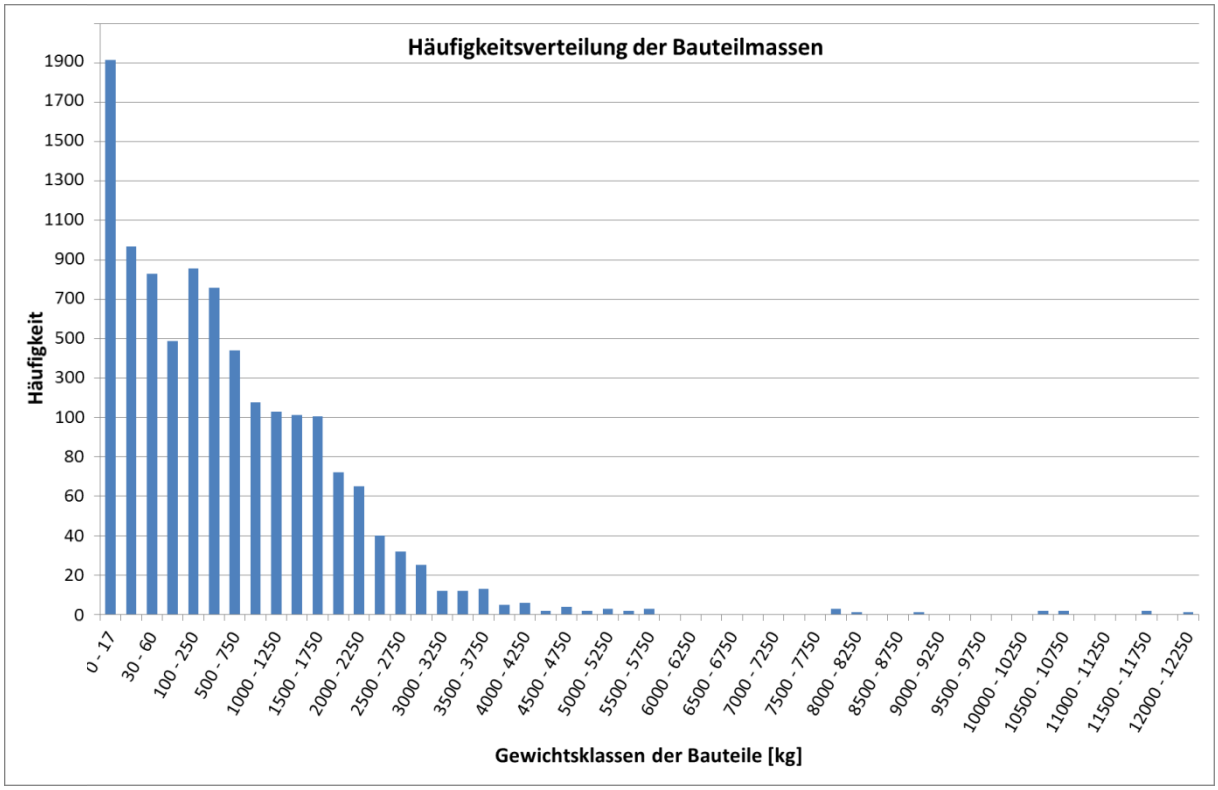

Abbildung 3.1: Häufigkeitsverteilung der Bauteilmassen des 2800 TEU Containerschiffes

Aus der Häufigkeitsverteilung der Bauteilmassen wurde für das Handhaben der Bauteile der verschiedenen Gewichtsklassen ein möglicher Gerätemix abgeleitet. Dabei wird eine Dreiteilung vorgesehen, die wie folgt strukturiert ist:

- Kleine Bauteile bis 17kg Masse sollen manuell,
- Bauteile zwischen 17kg und 2000kg sollen über ein neuartiges Traversenkonzept und
- Bauteile mit Massen über 2000kg sollen mit einer Großtraverse

vom Sortiertisch gehoben werden. Im Folgenden wird erläutert wie die Grenzwerte der Bauteilmassen definiert wurden. Die untere Grenze der Bauteilmassen der neuartigen Traverse ergibt sich aus der zulässigen Körperkraft eines Werkers. Diese wird mit der Formel (3.1) nach der Methode von Burandt ermittelt und ist abhängig von den Arbeitsbedingungen, den individuellen Eigenschaften sowie der Maximalkraft für das Heben und Absetzen von Lasten.

$$F_{zul} = P_1 \cdot P_2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot F_{max} \tag{3.1}$$

Tabelle 3.1: Faktoren für die Berechnung der zulässigen Körperkraft

Faktor	Bedeutung	Annahme	Wert
$\boldsymbol{P_1}$	Maximalkraft im Vergleich zu 30-jährigem Mann	Mitarbeiter: männlich, max.60 Jahre	0,73
$\boldsymbol{P_2}$	Faktor für Grad der Eignung	mindestens durchschnittliche Eignung	1,00
$\boldsymbol{K_1}$	Faktor für Beanspruchung	statische Beanspruchung (Haltezeit > 0,1s)	0,26
$\boldsymbol{K_2}$	Faktor für schwere Nebenarbeiten	keine schweren Nebenarbeiten	1,00
$\boldsymbol{K_3}$	Faktor für Körperhaltung und mitbewegte Körpermassen	ca. vier Bauteile / min	0,90
$\boldsymbol{K_4}$	Faktor für Lasthandhabung mit zwei Personen	Lasthandhabung alleine	1,00
$\boldsymbol{K_5}$	Lasthandhabung beidhändig	Lasthandhabung beidhändig	1,00
$\boldsymbol{F_{max}}$	maximal zulässige Körperkraft	Aufnahme-/Ablagehöhe ≤ 900mm	1000N ≈ 100kg

Werden für die Berechnung die in der Tabelle 3.1 aufgelisteten Faktoren verwendet, ergibt sich eine zulässige Kraft von 170N. Damit beträgt die zulässige Bauteilmasse für das manuelle Heben durch einen Werker etwa 17kg.

Die obere Grenze für die mit der neuartigen Traverse zu hebenden Bauteilmassen wurde auf 2000kg festgelegt, kann aber flexibel an die firmenspezifischen Anforderungen angepasst werden. Abhängig davon, wie der Grenzwert festgelegt wird, verschieben sich die prozentualen Anteile je Hebevorrichtungen bei der Aufteilung der zu hebenden Bauteile. In der Tabelle 3.2 sind für die festgelegten Gewichtsgrenzen der Traverse die prozentualen Verteilungen der Bauteile angegeben. Bei der Obergrenze von 2000kg können 70% aller Teile des Containerschiffes mit der neuen Traverse gehoben werden. Dies entspricht einem Anteil von 95% an allen, nicht durch einen Werker manuell gehobenen Bauteilen.

Tabelle 3.2: Bauteilhäufigkeitsverteilung nach Gewichtsgrenzen der neuartigen Traverse

Hebe-Art	Bauteilmassen	Anzahl	Prozent-Verteilung
Werker manuell	m < 17kg	1914	27%
neuartige Traverse	17 < m < 2000kg	4944	70%
Großtraverse	m > 2000kg	238	3%

Nachdem nun die Gewichtsgrenzen der durch die neuartige Traverse zu hebenden Lasten definiert sind, kann der Magnetdurchmesser festgelegt werden. Um die Anzahl der

notwendigen Magnete zu minimieren, ist der größtmöglich zu verwendende Magnetdurchmesser zu ermitteln. Dieser wird nach oben dadurch begrenzt, das jedes Bauteil von 17kg Masse, ohne über das Bauteil hinausstehende Magnete, zu heben ist. Die Suche nach dem maximalen Wert stellt sich als Optimierungsproblem dar. Um es zu lösen wird der Brute-Force-Ansatz verwendet. Dies ist ein sehr einfacher, aber rechenintensiver, Ansatz. Bei ihm werden alle potenziellen Lösungen durchprobiert, bis die richtige gefunden ist. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden mit diesem Ansatz alle Brennbilder analysiert und für jedes Bauteil der maximal mögliche Magnetdurchmesser ermittelt. Für die automatische Auswertung aller Brennbilder wurde die im Vorhaben entwickelte Software verwendet. Der angewendete Algorithmus ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

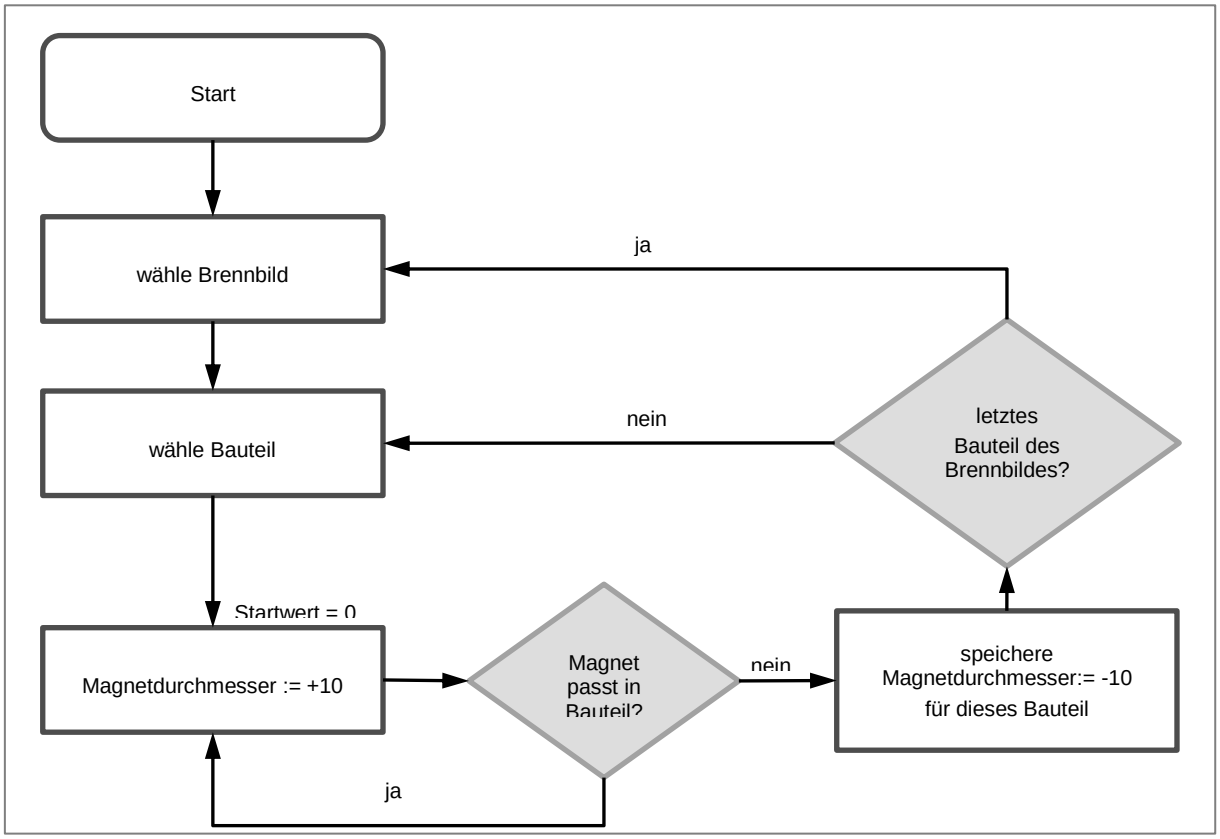

Abbildung 3.2: Brute-Force-Algorithmus für Ermittlung des Magnetdurchmessers

Als Ergebnis wurde ein maximaler Magnetdurchmesser von 100mm ermittelt. Magneten mit diesem Durchmesser können deckend auf alle Bauteile mit Massen größer als 17kg platziert werden. Elektromagneten mit diesem Durchmesser besitzen bei einem Luftspalt des Maßes Magnetdurchmesser/300 eine Abreißkraft von 2kN [11]. Für die maximale Traglast eines solchen Magneten ergibt sich, unter Berücksichtigung der Trägheit der Masse beim Anheben und einer Sicherheit von zwei, ein Wert für die maximale Bauteilmasse von 72,4kg, siehe Formel (3.2). Die Parameter für den Luftspalt, die Beschleunigung und die Sicherheit werden bewusst so gewählt, um der erhöhten Rautiefe des auf der Werft verarbeiten Materials und der dynamischen Belastung der Magnete Rechnung zu tragen.

$$m_{max} = \frac{F_{zul}/a}{S} = \frac{2\text{kN}/\left(9{,}81\frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 4\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{2} \approx 72{,}4\text{kg} \tag{3.2}$$

Nachdem die Traglast eines einzelnen Magneten bestimmt ist, kann nun die minimale Anzahl an Magneten für die Bauteile an der Gewichtsobergrenze der neuartigen Traverse bestimmt werden. Die Gewichtsgrenze liegt bei 2000kg und damit ergibt sich die notwendige Anzahl an Magneten mit einem Durchmesser von 100mm zu 28 Stück.

3.2 Verschiedene Anlagenkonzepte

Im Laufe der Projektbearbeitung wurden verschiedene Ideen für Anlagenkonzepte zur Verbesserung der Produktivität des Sortierbereiches entwickelt.

3.2.1 A – Magnettraverse mit starren einzeln ansteuerbaren Magneten

Der zu Projektbeginn angedachte Lösungsansatz beinhaltet den Einsatz einer speziellen Magnettraverse. Diese besteht aus einer Matrix von starr angeordneten Elektromagneten, welche durch ein übergeordnetes Rechnersystem einzeln ansteuerbar sind. In der Abbildung 3.3 ist die Anordnung exemplarisch für eine Traverse mit 28 Magneten dargestellt. Die Traverse kann zum Beispiel mit einem kartesischen Roboterportal orientierbar oder mit einem Portalkran starr verwendet werden.

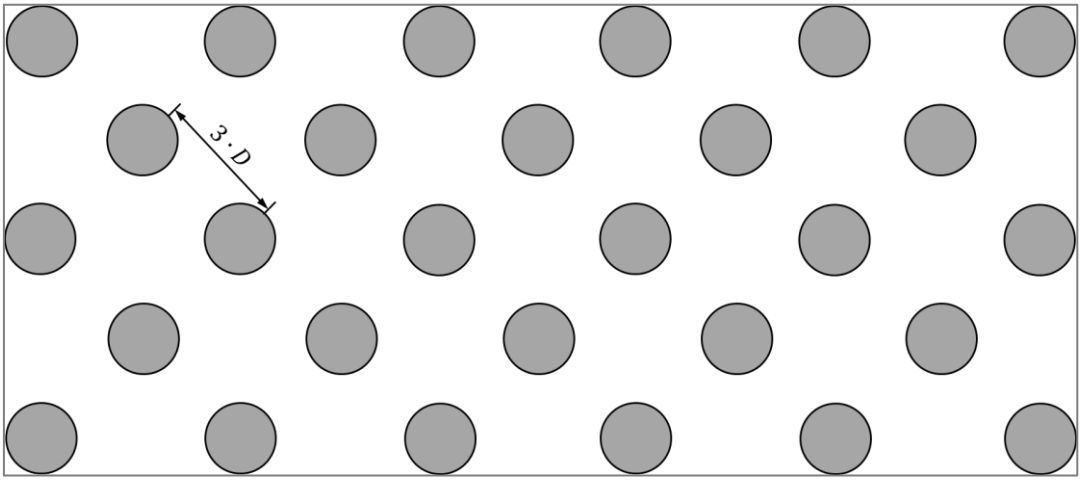

Abbildung 3.3: Starre Anordnung der Magnete bei Konzept A

Wie im Kapitel 3.1 bereits erläutert sind für das Heben aller Bauteile zwischen 17kg und 2000kg, rein unter dem Gesichtspunkt ihrer Masse, 28 Magnete mit einem Durchmesser von 100mm notwendig. Bei der Anordnung der Magnete nach Abbildung 3.3 mit einem gewählten Sicherheitsabstand vom Dreifachen des Durchmessers ergeben sich als Abmaße der Traverse in Längsrichtung 2,2m und in Querrichtung 0,95m.

Bei der Aufnahme von Lasten mit mehreren Magneten ist auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Last auf die einzelnen Magnete zu achten. Die Aufnahme von Blechen, welche sich aufgrund des Eigengewichtes durchbiegen können, sollte möglichst so erfolgen, dass die Länge des überstehenden Bleches etwa dem Halben Abstand a zwischen den einzelnen Magneten entspricht, siehe Abbildung 3.4. [12]

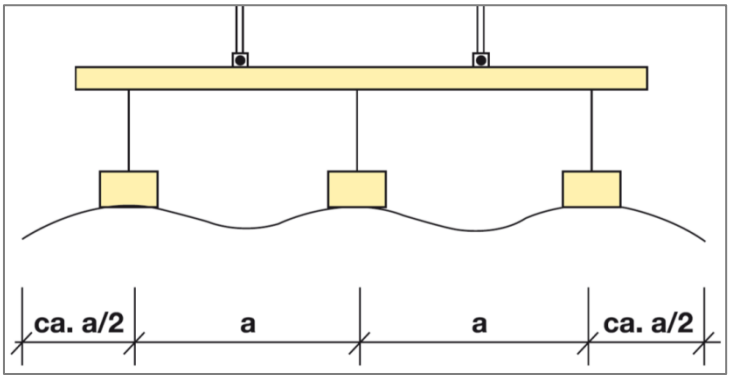

Abbildung 3.4: Empfohlener Randabstand beim Heben mit mehreren Magneten, [12]

Sollen die Vorgaben für den Randabstand der Magnete beachtet werden, sind neben den Massen der einzelnen Teile auch ihre Abmaße von Interesse. Aus den untersuchten Brennbildern des Standardcontainerschiffes (2800 TEU) wird aus den Bauteilen, welche mit der Traverse gehoben werden sollen, jenes mit dem größten Flächeninhalt ermittelt. Dieses besitzt eine Masse von 1997kg und Abmaße von etwa 9,5m x 2,5m bei einer Plattenstärke von 9mm. D. h. wenn die Anzahl der Magnete nicht erhöht werden soll, sind die 28 Magnete für das sichere Heben dieses Bauteil über dessen Fläche zu verteilen.

Da mit dieser Traverse aber auch alle anderen Teile zwischen 17kg und 2000kg gehoben werden sollen, ist diese einfache Umverteilung nicht möglich. Denn dann können einige andere Teile aufgrund der großen Abstände zwischen den Magneten nicht gehoben werden. Dafür wird von den Bauteilen die nahezu 2000kg wiegen, dasjenige ermittelt welches den kleinsten Flächeninhalt besitzt. Dieses hat eine Masse von 1946kg und Abmaße von etwa 11,7m x 0,4m bei einer Plattenstärke von 50mm. Sollen nun beide Bauteile mit der gleichen Traverse gehoben werden können, sind deutlich mehr Magnete notwendig. Um genügend Magneten über dem zweiten Bauteil platzieren zu können, darf der Magnetabstand nicht über den dreifachen Durchmesser erhöht werden. Bei dieser Anordnung der Magnete ergeben sich für die Traverse Abmaße von 11,7m x 2,5m und eine Magnetanzahl von 303. Mit dieser Konfiguration kann gewährleistet werden, dass alle relevanten Bauteile mit ausreichend Magneten sicher und möglichst verwindungsfrei gehoben werden können.

Es zeigt sich, dass bei diesem Konzept die Anzahl der Magnet sehr groß ausfällt und damit ebenfalls die Investitionskosten. Weiterhin ist es mit einer starren Verteilung der Magnete auf

der Traverse schwierig, kleinere Teile mit mehreren Magneten zu heben. Denn die Ermittlung einer Traversenposition für ein verwindungsarmes Heben von mehreren Bauteilen gleichzeitig gestaltet sich sehr aufwendig. Demzufolge trat bei der Simulation des Abräumens eines Brennbildes häufig der Fall auf, dass Bleche einzeln gehandhabt wurden. Dieser Umstand bietet keinen signifikanten Vorteil für die Durchlaufzeit des Prozesses. Daher wurde von diesem Konzept Abstand genommen.

3.2.2 B – Handhabungsroboter zum Sortieren kleiner und mittlerer Bleche

Der zweite Lösungsansatz beinhaltete den Einsatz eines Handhabungsroboters zum Erfassen kleiner und mittlerer Bleche. Um den geforderten Arbeitsraum zu erreichen, soll ein Portal als Gantry, an das der Roboter angebracht ist, eingesetzt werden. Das resultierende Anlagenkonzept ist in der Abbildung 3.5 dargestellt.

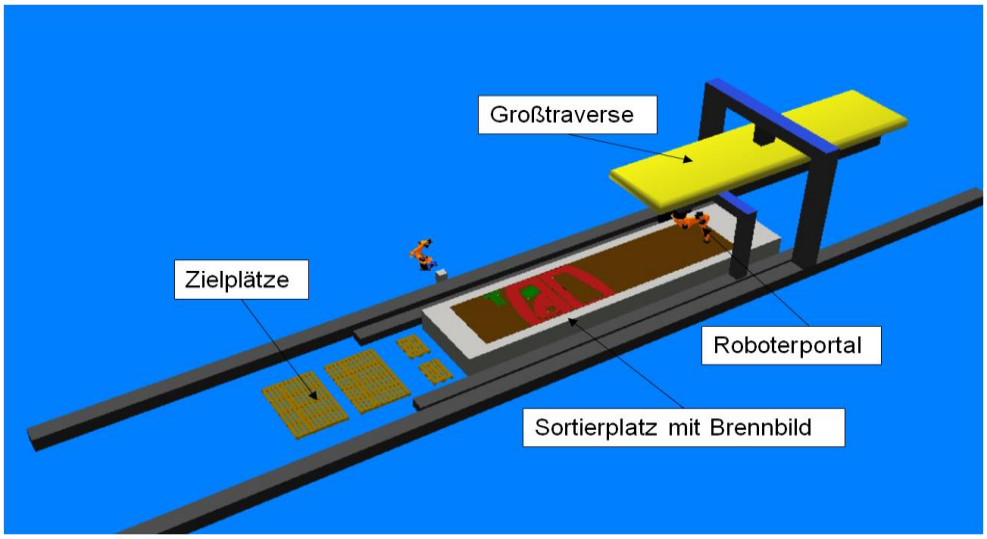

Abbildung 3.5: Anlagenkonzept B mit Roboterportal

Mit derzeit marktüblichen Portalsystemen wäre somit ein Sortierportal mit einer Traglast von mehreren hundert Kilo realisierbar. Mit dem Konzept kann das Handhaben von kleinen Teilen durch den Werker entfallen. Dafür liegt die Traglastobergrenze des Roboters unter den 2000kg. Dadurch sind mehr Teile mit der Großtraverse abzuräumen.

Das gesamte Anlagenkonzept wurde von den PbA-Teilnehmern als nicht sinnvoll bewertet. Dadurch, dass trotzdem nur Bleche einzeln gehandhabt werden, ergeben sich keine signifikanten Vorteile für die Durchlaufzeit des Prozesses. Somit sind die Investitionskosten für ein solches System nicht gerechtfertigt.

3.2.3 C – Flexible Traverse zum Handhaben kleiner und mittlerer Bleche

Eine bessere Lösung stellt eine Abwandlung des ersten Konzeptes dar. Dabei wird die Traverse mit den vielen starren, einzeln ansteuerbaren Magneten durch eine im Folgenden

erläuterte neuartige flexible Traverse ersetzt. Diese Traverse kann ebenfalls mit einem kartesischen Roboterportal, siehe Abbildung 3.6, orientierbar oder mit einem Portalkran starr verwendet werden. Im Gegensatz zu Konzept B ist die Traverse in der Lage mehrere Bleche mit einem Hub zu erfassen.

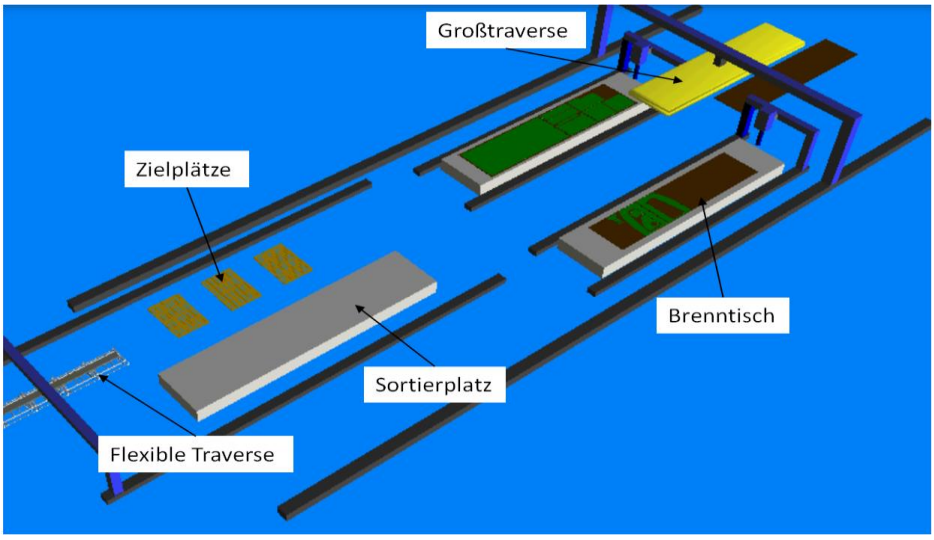

Abbildung 3.6: Anlagenkonzept C mit flexibler Traverse

Das angestrebte neuartige flexible Traversenkonzept zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass mit einem Hub mehrere Bleche gleichzeitig verwindungsarm erfasst werden können. Dies gelingt, da die Magneten einzeln positionierbar sind. Des Weiteren baut die Traverse wesentlich leichter als die bestehenden Geräte. Dadurch würde der Sortierprozess signifikant schneller werden. Die Funktionsweise dieser Traverse zeigt Abbildung 3.7. Die geforderte Flexibilität der Traverse wird dadurch erreicht, dass jeder Magnet über Linearachsen Freiheitsgrade (x, y) erhält. Mit Hilfe dieser Achsen können sich die Magnete entsprechend der auf dem Brennbild befindlichen Bauteile positionieren. Für die Positionierung der Magnete kommen die in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Schrittmotoren zum Einsatz.

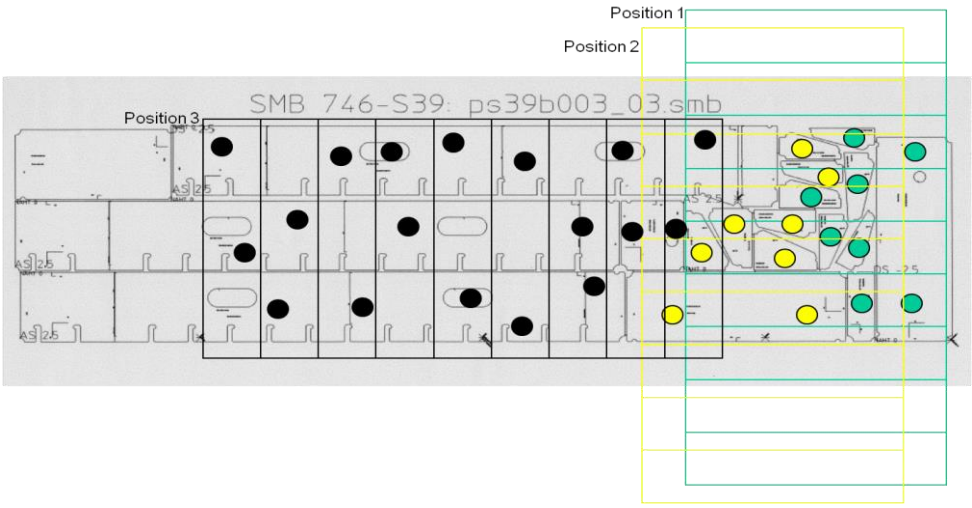

Abbildung 3.7: Flexible Magnettraverse beim Abräumen des Brenntisches in drei Hüben

Beim Einsatz dieser Traverse mit den in Kapitel 3.1 definierten Gewichtsgrenzen für die zu handhabbaren Bauteile von 17kg bis 2000kg ergeben sich mit 11,7m x 2,5m die gleichen Abmaße wie bei dem Konzept A. Der Vorteil des flexiblen Konzeptes liegt darin, dass gegenüber der Traverse mit den starren Magneten die Anzahl der Magnete nicht auf 303 Stück erhöht werden muss. Mit dem flexiblen Konzept ist nur die minimale Anzahl von 28 Magneten notwendig, da diese über den gesamten Bereich der Traverse einzeln positioniert werden können. Weiterhin ist es mit diesem Konzept möglich jedes Bauteil nahezu verwindungsfrei zu heben, da die Magneten genau positioniert werden können.

Der größte Vorteil dieses Konzeptes gegenüber Konzept A ergibt sich aus dem Vergleich der Investitionskosten der beiden Traversen. In der Tabelle 3.3 werden die Anschaffungskosten für die Komponenten der Traversen verglichen. Die Kosten pro Magnet fallen bei der flexiblen Traverse aufgrund der benötigten Motoren und zugehörigen Steuerungen mit 1950€ teurer als beim starren Konzept aus. Da bei dem Konzept A die Anzahl der Magnete aber über dem Zehnfachen der Magnetanzahl von Konzept C liegt, ist die flexible Traverse im Gesamten um einen Faktor von etwa 7,2 günstiger.

Tabelle 3.3: Kostenvergleich zwischen starrer und flexibler Traverse

Konzept:	starre Traverse	flexible Traverse
Einzelpreis Magnet D = 100mm	1.300€	1.300€
Einzelpreis Schrittmotor	-	250€
Anzahl Motoren pro Magnet	-	2
Einzelpreis Schrittmotorsteuerung	-	600€
Anzahl Steuerungen pro Magnet	-	0,25
Kosten pro Magnet	1.300€	1.950€
Anzahl Magnete	303	28
Gesamtkosten	393.900€	54.600€

4 Software zur Bauteillokalisation und Bewegungsplanung

Programmiert wurde in der Sprache VB.NET. Dies ist eine textbasierte Programmiersprache, welche auf Visual Basic aufbaut. Um die Programmierung der Benutzeroberfläche zu erleichtern, besteht die Möglichkeit, die GUI[3] grafisch zu erstellen. Schaltflächen und Anzeigeelemente können somit sehr leicht auf die gewünschte Form gebracht werden. Weiterhin handelt es sich hierbei um eine objektorientierte Sprache. In sogenannten Objekten werden Daten und Funktionen, welche auf diese Daten angewendet werden können, zusammengefasst um sie nach außen hin zu kapseln. Dadurch sind sie gegen versehentliche Manipulationen durch Methoden anderer Objekte geschützt. Diese Sprache wurde gewählt, da wichtige Programminhalte zur Auswertung von Brenndateien in VB.NET vorliegen und übernommen werden können. Das Verknüpfen mit weiteren Programmteilen wird dadurch wesentlich vereinfacht.

Im Folgenden werden die zur Umsetzung der Anforderungen an die Software verwendeten Methoden erläutert. Die Bedienung des Programms wird an einer Brenndatei beschrieben.

4.1 Anforderungen an die Software

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Software muss verschiedene Kriterien erfüllen. Diese Anforderungen können in drei Bereiche geordnet werden:

- Einlesen und Auswerten der Brenndateien:
  - Ermitteln des Brennerwegs
  - Bauteilgeometrien (Linien, Flächen, Massen)
  - Berechnung der Anzahl der Magneten sowie deren Positionen über dem Bauteil
- Einlesen und Auswerten der Markierdateien (sofern vorhanden):
  - Zuordnung der Markierungen zu den entsprechenden Bauteilen
  - Sortieren der Bauteile nach Bezeichnung
- Bewegungsplanung:
  - Steuerung der Linearachsen zur Magnetpositionierung
  - Portal-, Kran- bzw. Robotersteuerung

[3] GUI - Graphical User Interface - grafische Benutzeroberfläche

4.2 Methodendokumentation

Die gesamte Auswertung der Daten erfolgt in einem Pixelraster. Durch die diskrete Darstellung in Pixeln können einfache Methoden zur Auswertung angewandt werden.

4.2.1 Aufbau der Brenndateien (ESSI-Format)

Grundlage für die Erstellung von Positionsdaten für Traverse und Roboter stellt die Brenndatei dar, welche im ESSI-Format vorliegt. Diese Datei enthält spezielle Befehle für den Brenner, welcher die Bauteile heraustrennt. Um Eigenschaften und Fahrbefehle zu erkennen, wird diese Datei zeilenweise in das Programm eingelesen. Unterschieden wird zwischen Kommentaren (Dateikopf), Fahrbefehlen und Brennbefehlen. Jede dieser drei Kategorien wird durch vor- und nachgestellte Zeilen, in denen einzelne Zahlen stehen, begrenzt. Es gibt eine Zahl für den Anfang und eine für das Ende, wobei diese Zahlen allein in einer Zeile vor bzw. nach dem jeweiligen Bereich stehen.

Im Kopf dieser Datei stehen Materialeigenschaften wie Dicke, Legierung, Länge und Breite der Platte, siehe Tabelle 4.1. Länge und Breite werden übernommen, um die Größe der Grundplatte im Bild maßstabsgetreu zu erstellen. Der Kopf beginnt mit einer 3 und endet mit einer 4. Je nach Werft variieren die Syntax und die Informationen des Dateikopfes.

Tabelle 4.1: Beispiel für einen Dateikopf einer Brenndatei

Zeilen des Dateikopfes	Erläuterung
3	Beginn des Dateikopfes
Dateiname 55027526	Dateiname
Materialdicke = 8.0	Dicke der Platte in mm
Material S235JR	Material der Platte
Arbeitsbereich=S-Baustahl-200A/6-9,9mm/buegel	Arbeitsbereich des Benners
Plattenlänge = 2000	Länge der Platte in mm
Plattenbreite = 1000	Breite der Platte in mm
4	Ende des Dateikopfes

Reine Fahrbefehle beginnen mit einer 5 und enden mit einer 6, siehe Tabelle 4.2. Hierbei handelt es sich um relative Fahrbefehle. Es wird eine Linearbewegung ausgeführt, die Position wird vektoriell dargestellt. Das Vorzeichen bestimmt die Richtung. Reine Fahrbefehle erfolgen vor Brennbefehlen, um einen bestimmten Startpunkt anzufahren.

Tabelle 4.2: Beispiel für einen Fahrbefehl im ESSI-Format

Zeilen der Datei	Erläuterung
5	Beginn der Fahrt
+80+1892	relative Koordinatenangabe in 1/10mm, 8mm in X-Richtung, 189,2mm in Y-Richtung
6	Ende der Fahrt

Für die Brennbefehle, siehe Tabelle 4.3, kann es mehrere Zahlenpaare zur Eingrenzung geben. Diese sind abhängig davon, welcher Brenner benutzt wird und welche sonstigen Parameter für den eigentlichen Brennvorgang erforderlich sind. Im Rahmen des Projektes wird die Nahtvorbereitung nicht ausgewertet. Dadurch kann das Programm nur für das Brennen mit geraden Schnitten oder mit einer Orientierung der schrägen Schnitte, bei der zuerst die Brennteile und dann der Verschnitt gehoben werden muss, verwendet werden. Die Positionsparameter können verschiedene Formen annehmen. Für Linearbewegungen werden sie wie die reinen Fahrbefehle dargestellt. Soll aber eine kreisförmige Bewegung durchgeführt werden, wird zusätzlich der Vektor zum Mittelpunkt dieses Kreisbogens angegeben. Auch hier erfolgt die Angabe in relativen Werten und das Vorzeichen gibt die Richtung an. Unter Angabe dieser Parameter werden die Konturen der Teile erstellt.

Tabelle 4.3: Beispiel für einen Brennbefehl im ESSI-Format

Zeilen der Datei	Erläuterung
7	Beginn des Brennvorganges
+190-64	linearer Brennvorgang 190mm in X-Richtung, 64mm in negative Y-Richtung
+27-8+10-17-	Vektor Endpunkt: +27-8; Vektor Kreismittelpunkt: +10-17
8	Ende des Brennvorganges

Das Ende der Datei und damit des gesamten Fahrablaufs wird durch eine 63 oder 64 angegeben. Weiterhin gibt es noch eine Vielzahl anderer Befehle, wie z. B. das Markieren der Teile. Diese sind für diesen Anwendungsfall nicht von Belangen und werden deshalb nicht ausgewertet.

4.2.2 Diskrete Darstellung beliebiger Konturen

Um die verschiedenen Konturen der einzelnen Bauteile zu visualisieren wird der Bresenham-Algorithmus[4] verwendet. Dieser dient der Übertragung der eingelesenen Brennerwege auf ein Pixelraster. Für das Zeichnen von Linien mit dem Algorithmus werden lediglich die Koordinaten ihrer Anfangs- und Endpunkte benötigt.

[4] Bresenham-Algorithmus - 1962 von Jack Bresenham zum Zeichnen von Geraden auf Computerbildschirmen entwickelt

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0
5	0	0	0	0	0	**1**	0	0	0	0
6	0	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0
7	0	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0
8	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4.1: Darstellung einer Gerade nach Zeichnung mit Bresenham-Algorithmus

Die Abbildung 4.1 zeigt die Darstellung für eine Linie vom Punkt (8; 3) zum Punkt (3; 7) in einem Raster von 10 x 10 Längeneinheiten. Der Wert der Zahlen der Linie entspricht der Objektnummer, welcher diese Linie zugeordnet wird. Felder mit einer Null stehen für nicht bearbeitetes Material.

Um auch kreisförmige Strukturen zu erstellen, muss auch hierfür ein Algorithmus erstellt werden. Um verschiedenste Bogenlängen zu erstellen wird der Bresenham-Algorithmus abgeändert. Benötigt werden die Koordinaten des Start- und Endpunktes des Kreisbogens sowie des Mittelpunktes des Kreises. Nun werden, beginnend mit dem Startpunkt, die Pixel herausgesucht, die aneinandergereiht eine Gerade beschreiben. Anschließend werden über Sinus- und Cosinus-Funktionen weitere Randpixel errechnet. Alle ermittelten Randpixel beschreiben aneinandergereiht den gewünschten Kreisbogen, siehe Abbildung 4.2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	**K**	**K**	0	0	0	0
4	0	0	0	**K**	0	0	**K**	0	0	0
5	0	0	**K**	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	**K**	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 4.2: Darstellung einer Kurve nach Zeichnung mit Bresenham-Algorithmus

Über die Kombination dieser beiden Algorithmen ist es möglich, sämtliche Konturen der Bauteile zu visualisieren. Um Randpixel später als solche zu erkennen, wird ihnen zusätzlich das Attribut „R“ zugeordnet.

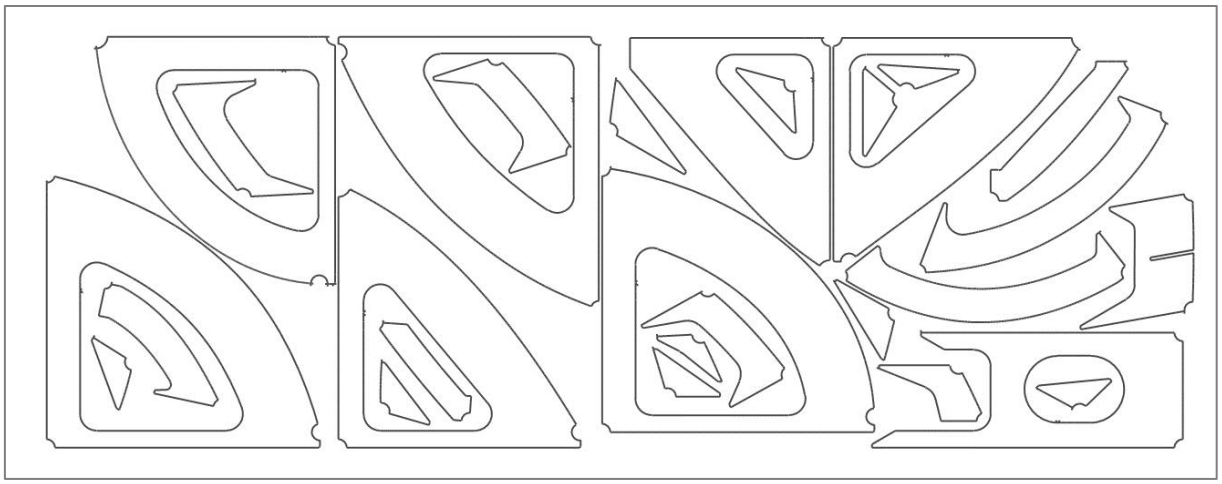

Abbildung 4.3: Darstellung der diskretisierten Kontur eines Brennbildes

In der Abbildung 4.3 sind die erstellten Konturen einer Brenndatei zu sehen. Gut erkennbar sind hier das Pixelraster und die Darstellung von kreisförmigen und linearen Brennwegen.

4.2.3 Prüfen und Füllen der Konturen

Um ein korrektes Auffüllen der Konturen zu gewährleisten, muss vorher sichergestellt sein, dass die Konturen geschlossen sind. Es wird ein Startpixel auf dem Rand gewählt, von dem aus nach Randpixeln gesucht wird. Anschließend werden alle Randpixel, beginnend mit dem Startpixel, nacheinander abgetastet. Wird das Startpixel wieder erreicht, ist die Kontur geschlossen. Werden allerdings Pixel entdeckt, die keine Nachbarpixel haben, werden die Koordinaten dieser Pixel als Lücke registriert. Jedes dieser Anfangs- und Endpixel einer gezeichneten Kontur bekommt entweder ein A für Anfangspixel oder ein E für Endpixel zugeordnet. Anschließend wird durch ein umschreibendes Rechteck um einen Endpixel ein Bereich definiert. Innerhalb dieses Bereiches wird nun nach Pixeln mit einem A gesucht. Das Anfangspixel mit der geringsten Entfernung wird ausgewählt. Zwischen End- und Anfangspixel wird nun eine lineare Verbindung hergestellt und die Lücke somit geschlossen.

Die Füllung der Konturen erfolgt ebenfalls von einem Startpixel aus. Dies wird dadurch gefunden, dass das Bauteil mit einem Rechteck umschrieben wird. Die Rechteckdiagonale sowie deren Mittelpunkt werden ermittelt. Nun wird vom Mittelpunkt aus in Richtung linker oberer Ecke jedes Pixel der Diagonalen überprüft, ob es innerhalb einer Kontur liegt. Dazu wird jedes der durchsuchten Pixel auf die Objektnummer und das Attribut „R“ überprüft. Liegt ein Pixel der Diagonalen zwischen zwei Randpixeln mit gleicher Objektnummer wird dieses Pixel als Startpixel festgelegt. Wird auf diesem Weg kein Startpixel gefunden, werden die

Pixel der Diagonalen vom Mittelpunkt in Richtung rechte untere Ecke auf Randpixel durchsucht. Von dem gefundenen Startpixel aus werden jetzt nur die Pixel überprüft, die waagerecht oder senkrecht zum gefundenen Pixel stehen, siehe Abbildung 4.4. Dadurch werden nur die Pixel innerhalb eines geschlossenen Konturrandes überprüft.

Abbildung 4.4: Zu prüfende Nachbarpixel beim Füllen einer Kontur

Ist ein zu überprüfendes Pixel kein Element des Randes der Kontur wird es dieser Kontur zugeordnet und dabei mit dem Attribut „F“ versehen. Das „F“ zeigt an, dass dieses Pixel zur Fläche gehört. Nun werden alle der Kontur zugeordneten Pixel, welche nicht dem Rand angehören, erneut mit diesem Suchsystem bearbeitet. Dies geschieht solange, bis kein neues Pixel mehr gefunden wird.

Der Füllalgorithmus wird auf alle Konturen angewendet. Dadurch entsteht ein Bild mit den gefüllten Bauteilflächen Abbildung 4.5.

Abbildung 4.5: Diskrete Abbildung der ausgefüllten Flächen

4.2.4 Objektunterscheidung und Verschachtelung

Verschiedene Brennvarianten sowie eine ökonomische Verwendung des Materials führen zur Verwendung von Verschachtelungen, siehe Abbildung 4.5. Daher müssen Ausbrände innerhalb der Bauteile als Verschnitt erkannt werden. Zudem ist es möglich, das innerhalb dieser Ausbrände das Material für andere Bauteile verwendet wird, was nicht als Verschnitt gewertet werden darf. Um dies zu unterscheiden, werden zuerst alle diese potenziellen Bauteile als solche behandelt. Weiterhin wird überprüft, ob alle Randpixel eines Ausbrandes direkt an ein anderes Bauteil grenzen. Liegt innerhalb dieses Ausbrandes ebenfalls ein Teil, wird diese Überprüfung für dieses ebenfalls vorgenommen. Anschließend werden für diese potenziellen Bauteile auf Geraden in mehrere verschiedene Richtungen die Randüberschreitungen bis zum Plattenende gezählt. Durch die Formenvielfalt ist es notwendig, in verschiedene Richtungen zu zählen. Ist diese Anzahl ungerade, handelt es sich bei dem Teil, ab welchem gezählt wurde, um ein Bauteil. Ist die Anzahl gerade, handelt es sich um Verschnitt. Als Verschnitt markierte Pixel erhalten keine Objektnummer und werden somit wieder der Grundplatte zugeordnet. Nach dem alle Bauteile mit diesem Sortieralgorithmus bearbeitet wurden, wird erneut ein Bild mit den Bauteilen erstellt, siehe Abbildung 4.6.

Abbildung 4.6: Diskrete Abbildung der Bleche

4.2.5 Zuordnung der Objektbezeichnungen

Die Objektbezeichnungen werden als Markierdaten bereitgestellt. Diese sind je nach Werft in der Brenndatei vorhanden oder in eine zusätzliche Datei ausgelagert. Das Auslesen der Markierdaten erfolgt wie bei der Brenndatei zeilenweise. In einer Zeile sind die Position der Markierung sowie die Sektionsnummer oder der Leitweg vorhanden. Über ihre Positionen werden die Sektionsnummern oder Leitwege den Teilen zugeordnet. Ist die Position der Markierung innerhalb der Fläche eines Bauteils, bekommt dieses Bauteil den Leitweg oder die Sektionsnummer dieser Markierung. Alle anderen Informationen aus den Markierdaten

werden nicht verwendet. Der Markiertext eines Bauteils wird allen zugehörigen Pixeln in ihren Eigenschaften abgespeichert.

4.2.6 Massenberechnung

Die Masse m wird über den folgenden Ansatz berechnet:

$$m = \rho V \tag{4.1}$$

Wobei ρ die Dichte und V das Volumen des ausgewählten Bauteils darstellt. Das Volumen ist allgemein über

$$V = \iiint_l \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y\,\mathrm{d}z \tag{4.2}$$

definiert. Da die Materialdicke bei Brennverfahren i. a. gleich bleibt, kann $\mathrm{d}z$ als Konstante angenommen werden. Damit vereinfacht sich das Integral zu

$$V = z \iint_l \mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \tag{4.3}$$

Das Doppelintegral stellt den Flächeninhalt des Bauteils dar. Wenn davon ausgegangen wird, dass es sich um eine diskrete Pixeldarstellung und nicht um die Fläche eine Funktion handelt, kann dieses Integral in

$$A = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{d}x \sum_{i=1}^{n} \mathrm{d}y \tag{4.4}$$

umgewandelt werden. Das n steht hier für die Anzahl der Pixel, $\mathrm{d}x$ und $\mathrm{d}y$ für die Seitenlängen des Bauteils. Die Elemente des Pixelrasters sind als Quadrate definiert, es gilt $\mathrm{d}x = \mathrm{d}y$. Dadurch dass die Angaben in der Brenndatei in 1/10mm erfolgen gilt für die Flächenberechnung die Formel

$$A = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{M}{10}\right)^2 \tag{4.5}$$

Die Einheit der Fläche ist mm^2. Der Maßstab M wird vom Benutzer vorgegeben und ist somit zur Laufzeit bekannt. Diese Art der Flächenberechnung ist nicht sehr genau. In der Abbildung 4.7 ist zu erkennen, wie die diskretisierte Fläche an ihrem Rand dargestellt wird.

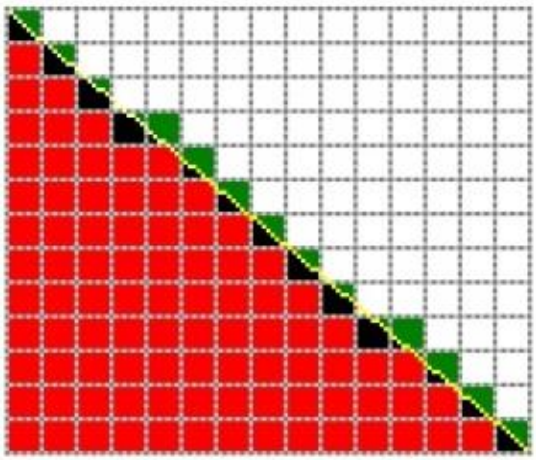

Abbildung 4.7: Fehler in der Flächenberechnung

Werden die Randpixel bei der Berechnung ignoriert, wird die berechnete Fläche zu klein. Es werden nur die roten Pixel zur Berechnung verwendet. Werden sie allerdings mit einbezogen, entsteht ein zu großer Flächeninhalt, da der grüne Anteil miteinbezogen wird. Bezüglich der Sicherheit ist es sinnvoll, die größere Fläche zu wählen, da mit Hilfe der Fläche die Masse der Bauteile berechnet werden soll. Deshalb werden die Randpixel mit einbezogen.

4.2.7 Flächenschwerpunktberechnung

Soll ein Bauteil mit nur einem Magneten gehoben werden, ist dafür die Position des Schwerpunkts dieses Bauteils nötig. Berechnet wird der Gesamtschwerpunkt s_{gesamt} über die Einzelschwerpunkte der Pixel.

$$s_{gesamt} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i s_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{4.6}$$

Hierbei stellt A_i die Fläche und s_i den Schwerpunkt eines einzelnen Pixels dar. Das n gibt die Anzahl der Füllpixel an. Dadurch, dass die Fläche A_i für jedes der Pixel gleich ist, kann dieser Faktor aus der Summe im Zähler herausgezogen werden. Der Nenner kann ersetzt werden durch

$$\sum_{i=1}^{n} A_i = (A_1 + A_2 + A_3 + . . . + A_n) = n\, A_i \tag{4.7}$$

Daraus ergibt sich die Gleichung (4.8) für die Schwerpunktberechnung.

$$s_{gesamt} = \frac{\sum_{i=1}^{n} s_i}{n} \tag{4.8}$$

Um den Schwerpunkt s_{gesamt} ermitteln zu können, werden die Anzahl der Pixel n sowie die globalen Schwerpunkte der einzelnen Pixel benötigt. Die Anzahl der Pixel sind schon aus der Massenberechnung bekannt. Der globale Schwerpunkt wird aus dem lokalen Schwerpunkt berechnet.

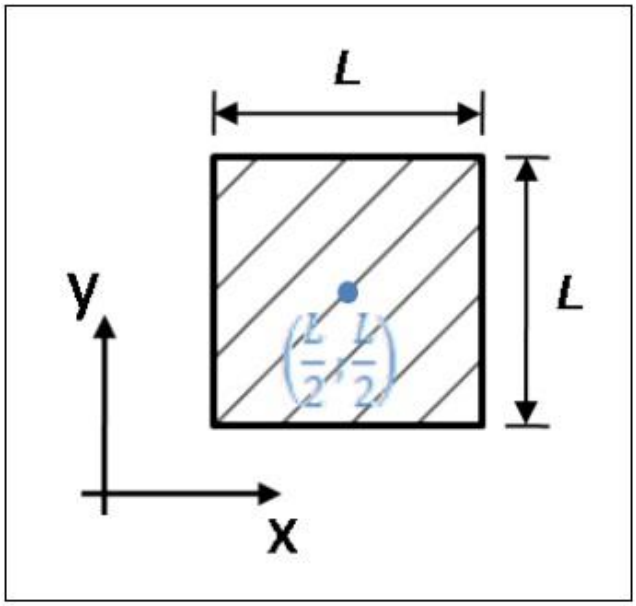

Abbildung 4.8: Flächenschwerpunkt eines Pixels

In Abbildung 4.8 wird die Berechnung der Koordinaten des lokalen Schwerpunktes s_{lokal} verdeutlicht. Der Schwerpunkt eines Quadrates liegt in seiner Mitte. Es ist genau eine halbe Seitenlänge in jede Richtung. Diese lokalen Koordinaten müssen in die globalen Koordinaten des Pixelrasters übertragen werden. Dies geschieht in Abhängigkeit der Seitenlänge L, die für jedes der Pixel konstant ist.

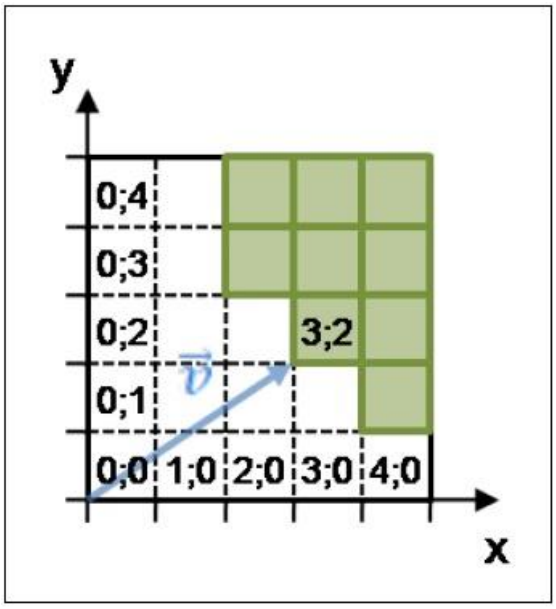

Abbildung 4.9: Lage eines Pixels

In Abbildung 4.9 ist beispielhaft zu erkennen, dass die Position der linken unteren Ecke eines Pixels durch einen Vektor vom Koordinatenursprung dargestellt werden kann. Der eingezeichnete Vektor $\vec{v}$ kann somit durch

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} x\,L \\ y\,L \end{pmatrix} \tag{4.9}$$

beschrieben werden. Um von diesem Vektor $\vec{v}$ auf den Schwerpunkt zu schließen, muss auf jede der Koordinaten von $\vec{v_i}$ der Wert $\frac{L}{2}$ addiert werden:

$$s_i = \begin{pmatrix} L(x_i + \frac{1}{2}) \\ L(y_i + \frac{1}{2}) \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

Durch das Einsetzen von s_i in die Gleichung (4.8) ergibt sich für den Gesamtschwerpunkt die Gleichung:

$$s_{gesamt} = \begin{pmatrix} s_{gesamt,x} \\ s_{gesamt,y} \end{pmatrix} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \begin{pmatrix} L(x_i + \frac{1}{2}) \\ L(y_i + \frac{1}{2}) \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

4.2.8 Magnetverteilung je Bauteil

Nachdem die Massen- und Schwerpunktberechnung abgeschlossen ist, sollen anschließend die Magneten verteilt werden. Für die Ermittlung der Magnetpositionen müssen die Magnethebekraft sowie die Länge und Breite der Traverse bekannt sein. Diese Parameter können vom Anwender zur Laufzeit des Programms definiert werden. Bauteile können nicht gehoben werden, wenn

- die gesamte Hubkraft aller Magneten kleiner als die Gewichtskraft des Bauteils ist oder
- die Traverse von der Größe her nicht ausreicht, um einen stabilen Hub zu gewährleisten.

Alle anderen Hubvarianten sind möglich. Der einfachste Fall ist, dass ein Bauteil durch einen einzigen Magneten gehoben werden kann. Dies ist abhängig von Masse und Form des Bauteils. Wird nur ein Magnet benötigt, erfasst dieser das Bauteil idealer Weise im Schwerpunkt. Für ein U-förmiges Bauteil kann der Schwerpunkt z. B. außerhalb der Bauteilfläche liegen und somit kann das Teil nicht mit einem Magneten gehoben werden. Weiterhin ist es möglich, ein für einen Magneten zu schweres Bauteil mit mehreren

Magneten zu heben. Um dies zu realisieren, wird der Voronoi Algorithmus[5] angewendet. Bei der Anwendung dieses Algorithmus wird zuerst die Anzahl der Magneten ermittelt, die zum Anheben der Bauteilmasse benötigt wird. Es werden so viele Punkte auf dem Bauteil zufällig verteilt, wie Magnete zum Heben nötig sind. Jedem dieser Punkte wird dann ein Bereich zugeordnet, der näher zu diesem Punkt als zu allen anderen Punkten liegt. Anschließend werden diese Punkte auf den Schwerpunkt dieses Bereichs verschoben und es wird erneut jedem Punkt ein Bereich zugeordnet. Dies geschieht solange, bis die Punkte nur noch eine sehr geringe Bewegung zeigen. Nach Beendigung des Algorithmus werden den Magnetpositionen die ermittelten Punktkoordinaten zugeordnet. Da diese Magnetpositionen gleichzeitig Schwerpunkte ihres Bereichs sind, ist sichergestellt, dass keine Momentbelastungen durch ungleichmäßige Gewichtsverteilung an der Magnetfläche wirken.

4.2.9 Ermittlung der zu erfassenden Teile je Hub

Beginnend mit der linken, unteren Ecke werden alle Bauteile durchnummeriert. Anschließend werden die Bauteile ermittelt, welche mit einem gemeinsamen Hub angehoben werden können. Dafür müssen die Teile verschiedene Anforderungen erfüllen.

Die Magnete müssen auf die ermittelten Positionen innerhalb der Traversenabmaße positioniert werden können. Die Anzahl der Magnete einer Traverse muss ausreichen, um das Teil zu heben. Die Hubkraft der vorhandenen Magneten muss für das Gewicht des Bauteils ausreichen. Die Magnetpositionen müssen einen vorgegebenen Mindestabstand vorweisen.

Nun werden die Hübe für die Teile erstellt, die mit den o.g. Bedingungen erfasst werden können, ohne die Traverse um 90° zu drehen. Hierbei geht das Programm alle Teilenummern beginnend bei der Eins durch. Werden alle Magneten verwendet, wird dieses Teil in einem Einzelhub erfasst. Wird nur ein Magnet benötigt, sucht das Programm nach dem Bauteil mit der nächst höheren Nummer, welches weiterhin erfassbar ist. Dieses wird dann dem Hub zugeordnet. Sind noch weitere Magneten frei, wird nach weiteren Teilen gesucht, die mit diesem Hub erfasst werden könnten. Sind alle Magnete belegt oder keine Teile mehr in Reichweite, wird für die verbleibenden Bauteile, beginnend bei der niedrigsten Teilenummer, der nächste Hub ermittelt. Alle so nicht erfassten Bauteile werden erneut mit diesem Algorithmus behandelt, allerdings wird dann eine Drehung der Traverse von 90° angenommen.

[5] Voronoi Algorithmus – Algorithmus zur Zerlegung einer Fläche in eine vorgegebene Anzahl von Bereichen

4.2.10 Positionsfindung der Magnettraverse

Es existieren verschiedene Koordinatensysteme, das des Portals bzw. Roboters und das der Traverse. Die Koordinaten der Magnetpositionen werden in Kapitel 4.2.8 im Koordinatensystem des Portals ermittelt. Da dieses Koordinatensystem dem Steuerelement der Traverse unbekannt ist, müssen die Koordinaten in das Traversenkoordinatensystem konvertiert werden. Da die Traverse an ihrem Mittelpunkt mit dem Portal verbunden ist, dient dieser Punkt als Anhaltspunkt zur Umrechnung. Der Mittelpunkt der Traverse wird für jeden Hub über die zugehörigen Magnetpositionen ermittelt. Es ist die Position, bei der der Mittelpunkt zu den ermittelten Magnetpositionen den geringsten Abstand besitzt. Die Traverse wird mit dem Traversenmittelpunkt als Nullpunkt in vier Quadranten (Q1 - Q4) eingeteilt, siehe Abbildung 4.10.

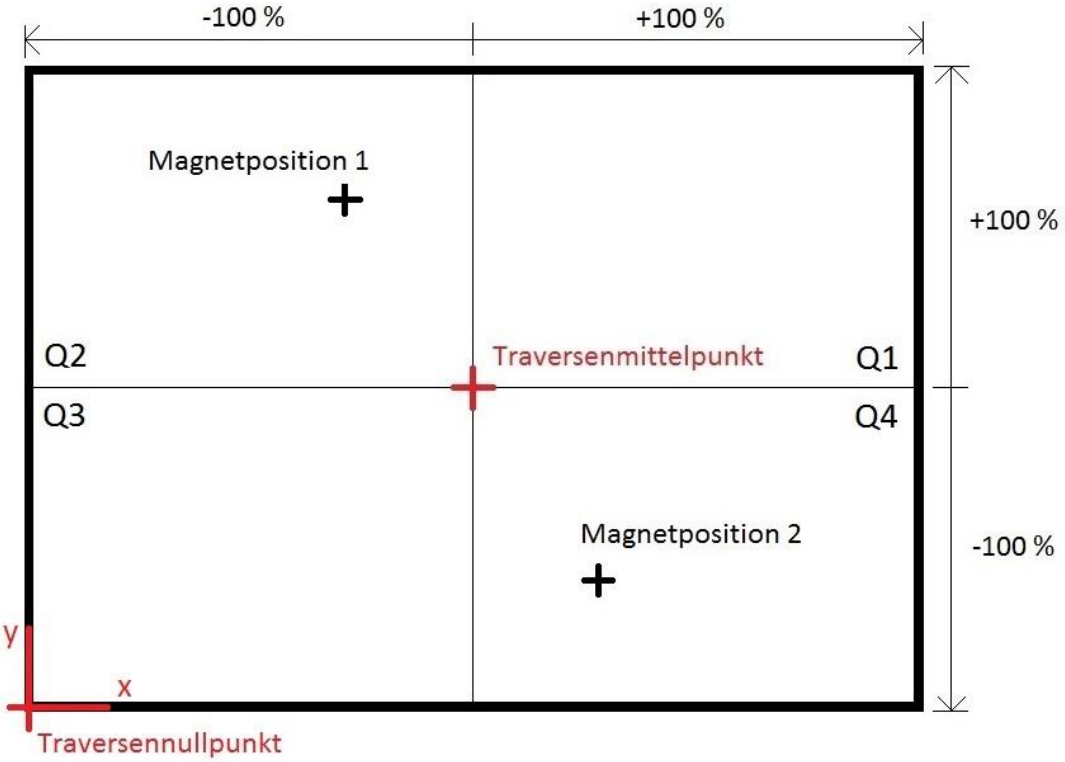

Abbildung 4.10: Einteilung der Traverse in vier Quadranten

Alle Magnetpositionen werden in Prozent abhängig von Traversenbreite bzw. –länge umgerechnet. Die gesamte Traversenlänge ist also 200% des Weges. Es können hierbei auch negative Prozentwerte auftreten. Betrachtet man beispielsweise die Magnetposition 1, beträgt die Längenkoordinate hier 60%, die Breitenkoordinate allerdings -30%. Um die Punkte in Traversenkoordinaten $\binom{x_{trav}}{y_{trav}}$ zu erhalten, erfolgt die Umrechnung der Magnetpositionen in Portalkoordinaten $\binom{x_{magn}}{y_{magn}}$ mit den Gleichungen (4.12) und (4.13).

$$x_{trav} = \frac{trav_breite}{2} + \frac{x_{magn}}{200}\ trav_breite \tag{4.12}$$

$$y_{trav} = \frac{trav_länge}{2} + \frac{y_{magn}}{200}\ trav_länge \tag{4.13}$$

Die Variable $trav_länge$ gibt die Länge und die Variable $trav_breite$ gibt die Breite der Traverse an. Das Traversenkoordinatensystem besitzt den Nullpunkt in der linken unteren Ecke der Traverse, siehe Abbildung 4.10. Somit ist eine Positionsumrechnung zwischen dem Koordinatensystem des Portals bzw. Roboters und dem Koordinatensystem der Traverse möglich.

Wurde ein Bauteil erfasst, muss es zum vorgesehenen Ablageplatz überführt werden. Die vorhandenen Ablageplätze werden mit ihren Koordinaten im Quellcode vorgegeben. Über den bekannten Versatz des Traversenmittelpunktes zum Bauteil ist eine korrekte Positionierung auf dem Ablageplatz möglich. Beim mehrfachen Ablegen auf den gleichen Ablageplatz wird die Ablagehöhe um die Blechdicke erhöht, so dass ein Stapel entsteht und eine Verformung der Bleche durch den Aufprall ausgeschlossen wird. Für die Bestimmung des Ablageplatzes sind verschiedene Sortierstrategien möglich. Es kann z. B. nach

- Bauteilmasse,
- Bauteilflächeninhalt,
- Sektionsnummer oder
- Leitweg

sortiert werden. Im Programmcode ist das Sortieren nach den in Kapitel 4.2.5 ermittelten Sektionsnummern und Leitwegen umgesetzt. Durch die Auswertung des Leitweges können die Bauteile entsprechend der Nachfolgestationen sortiert werden.

4.2.11 Bewegungsplanung und Ansteuerung der gesamten Traverse

In den vorangegangenen Abschnitten wurden alle Daten ermittelt, welche zum Abräumen der Bauteile nötig sind. Es werden allerdings noch systembezogene Koordinaten benötigt, um die Traverse zu positionieren. Die Koordinaten der Ablagefächer müssen im Quellcode im Portal- bzw. Roboterkoordinatensystem hinterlegt werden. Es werden diverse Sicherheitspunkte verlangt, die eine Kollision der Traverse mit Umgebungsobjekten verhindern:

- Position über dem Brenntisch: dient als Zwischenpunkt vor der Traversenpositionierung
- Sichere Position über dem Bauteil: dynamische Koordinaten, abhängig von der Bauteillage und Höhe des Brenntisches

- Zwischenpunkt: dient der Vermeidung einer Kollision mit dem Roboter
- Position über den Ablagefächern: allgemeine Position, von der aus sich alle Ablagefächer anfahren lassen
- Sichere Positionen über dem jeweiligen Ablagefach: dient der Vermeidung von Kollisionen mit dem Rand des Ablagefachs

Die Koordinaten dieser Sicherheitspunkte müssen vor Inbetriebnahme an das jeweilige System angepasst werden.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird der Ablauf eines Hubs am Beispiel des Versuchsstandes beschrieben. Nach dem Programmstart muss zu Beginn eine Referenzfahrt ausgeführt werden. Dies betrifft vor allem die vier Achsen der Traverse, der Roboter wird beim Start schon referenziert. Referenziert wird die Traverse, indem jede Achse auf die zugehörige negative Endlage gefahren wird. Nachdem die Referenzfahrt beendet wurde, kann mit der Positionierung begonnen werden. Die Traverse wird als erstes über den Brenntisch gefahren. Anschließend wird sie in sichere Höhe über die Aufnahmeposition gebracht, um ein gleichzeitiges Positionieren der Magneten zu ermöglichen. Dies kann etwas mehr Zeit in Anspruch nehmen als die Positionierung der Traverse. Ist die Positionierung der Magneten abgeschlossen, bewegt sich die Traverse senkrecht auf das Blech, bis die Magneten die Bauteile berühren. Dies ist ebenfalls wichtig, da bei einer nicht senkrechten Fahrt die Gefahr besteht, dass sich die Achsen durch die Kraft des Aufsetzens der Traverse verschieben können. Somit wäre die Ist-Position nicht mehr mit der dem Programm bekannten Position identisch, was eine fehlerhafte Positionierung der weiteren Hübe zur Folge hätte. Im Anschluss werden die Magneten eingeschaltet und die Traverse bewegt sich senkrecht in die sichere Position. Nun wird die Traverse auf die Anfangs eingenommene Position über dem Brenntisch positioniert. Die Traverse und Bleche werden unter Verwendung des Zwischenpunktes auf eine Position über den Ablageflächen gefahren. Für jedes der erfassten Bleche erfolgt folgender Ablauf:

- Positionieren der Traverse in sichere Höhe über dem Ablageflach
- senkrechtes Abwärtsfahren der Traverse auf die Ablageposition, um eine Verschiebung der Achsen zu vermeiden
- Abschalten der Magneten
- senkrechte Fahrt aufwärts auf sichere Höhe
- Positionieren der Traverse über den Ablagefächern

Sind alle Bleche abgelegt, wird die Traverse unter Verwendung des Zwischenpunktes über den Brenntisch gefahren und der nächste Hub kann beginnen.

4.3 Benutzerdokumentation

Die grafikgestützte Programmierung in VB.NET ermöglicht die Eingabe der benötigten Eingangsdaten über Windows-Benutzersteuerelemente und die Visualisierung der ermittelten Ergebnisse. Im Folgenden soll die Bedienung des Programms anhand einer beispielhaften Brenndatei beschrieben werden.

4.3.1 Startfenster

Nach dem Programmstart erscheinen die zwei, in Abbildung 4.11 dargestellten Startfenster. Da das Programm aus mehreren Fenstern besteht, besitzen alle Fenster aus Gründen der Übersichtlichkeit die Eigenschaft „immer im Vordergrund halten“. Will der Benutzer andere Funktionen im Betriebssystem verwenden, kann er über die Schaltfläche *alle Formulare minimieren* die Fenster des Programms minimieren.

Abbildung 4.11: Kommentierte Startfenster der BleSo-Steuerung

Im unteren Bereich befindet sich die Robotersteuerung. Dieses Fenster wird während des gesamten Programmablaufes eingeblendet. Die durch *Label7* gekennzeichneten Anzeige-elemente geben dem Benutzer eine Rückmeldung über die Positionen der Roboterachsen. Die vorgestellten Textfelder ermöglichen eine Steuerung des Roboters unabhängig von der Traverse. Somit kann beispielsweise die Traverse manuell in der Position verschoben werden. Der Benutzer muss nur noch angeben, ob es sich um relative oder absolute Koordinaten handelt und anschließend den Knopf *CP-Bewegung* betätigen.

Über die Schaltfläche *Regler Aus* wird der Regler auf der Traverse abgeschaltet, der Roboter bleibt in Bereitschaft. Der Knopf *Programm beenden* beendet alle Bewegungsabläufe und schließt das gesamte Programm. Über das Ordnersymbol in der oberen linken Ecke, erreicht der Benutzer das Eingabefenster.

4.3.2 Eingabefenster

Das in Abbildung 4.12 dargestellte Eingabefenster zeigt den Zustand bereits nach dem Einlesen der Brenndatei. Die zuvor durchgeführten Schritte sind in der Abbildung durchnummeriert.

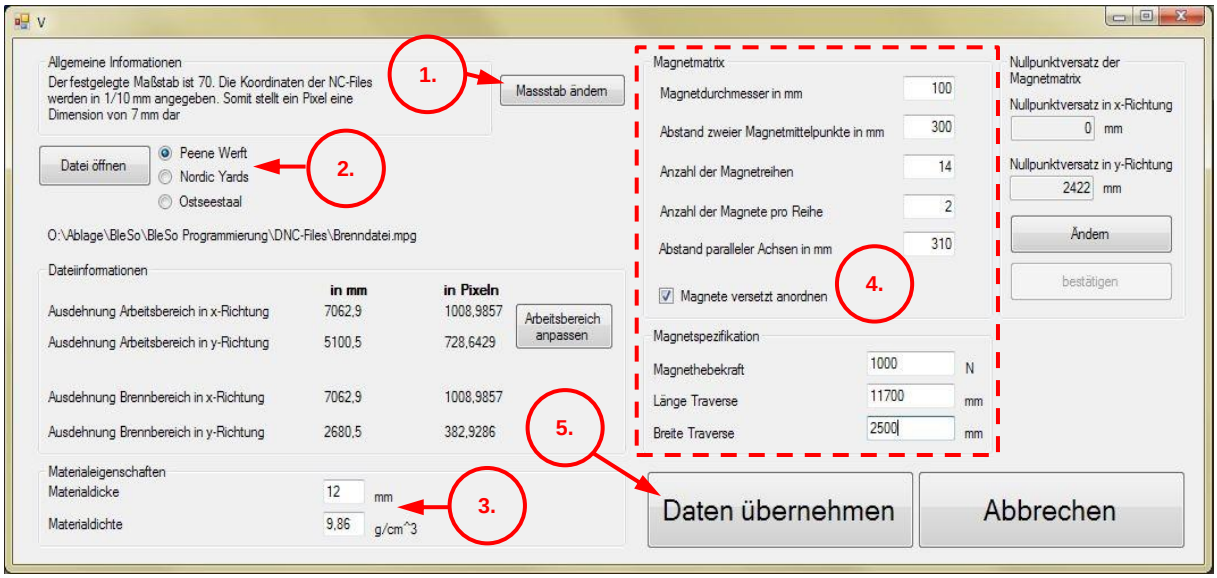

Abbildung 4.12: Kommentiertes Eingabefenster der BleSo-Steuerung

Bevor eine Datei eingelesen wird, sollte ein Maßstab für das Pixelraster gesetzt werden. Dies ist über die Schaltfläche *Maßstab ändern* (1.) möglich. Der dort angegebene Wert kann als Standardwert oder als Wert, nur für diesen Programmlauf, festgelegt werden. Weiterhin ist vor dem Einlesen einer Brenndatei das zugehörige Unternehmen auszuwählen, da sich die Syntax der Dateien zwischen diesen unterscheidet. Im Programm wurden drei verschiedene Typen für die Unternehmen

- Peene Werft,
- Nordic Yards und
- Ostseestaal

implementiert. Je nach der Auswahl des Benutzers kann anschließend über die Schaltfläche *Datei öffnen* (2.) eine entsprechende Datei geöffnet werden. Bei der Auswahl von Nordic Yards bzw. Ostseestaal wird zusätzlich zur Brenndatei eine Markierdatei benötigt, worauf der Benutzer vor der Auswahl der Dateien hingewiesen wird. Wurde die Datei eingelesen, füllt sich das Feld *Dateiinformationen* mit den entsprechenden Daten. Der Arbeitsbereich ist nun per Knopfdruck auf *Arbeitsbereich anpassen* optional veränderbar. Die Materialdicke und -dichte werden aus den Brenndateien ermittelt. Ist eine Materialeigenschaft nicht vorhanden, muss sie manuell eingetragen werden (3.).

In den Feldern *Magnetmatrix* und *Magnetspezifikation* können die Parameter der Magnettraverse verändert werden (4.). Es sind Angaben zum Magnetdurchmesser und zum Sicherheitsabstand zwischen den Magneten zu machen. Weiterhin sind die Anzahl der Magnetreihen und die Anzahl der Magneten pro Reihe anzugeben. Eine Magnetreihe entspricht dabei im Aufbau dem Funktionsmuster, siehe Abbildung 4.13.

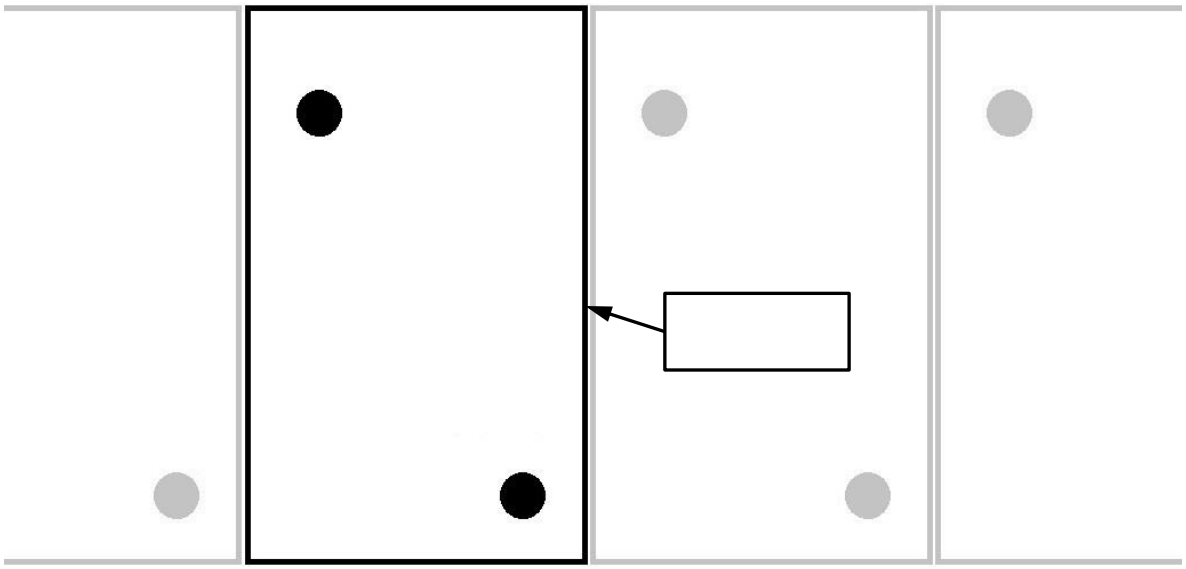

Abbildung 4.13: Darstellung einer Magnetreihe mit zwei Magneten

Das Feld *Abstand parallelen Achsen in mm* gibt den, durch die Konstruktion der Linearachsen begrenzten, minimalen Abstand zwischen zwei benachbarten Magneten an. Dieser Wert ist nötig, um die Kollision zweier paralleler Achsen zu verhindern. Weiterhin müssen die Breite und die Länge der Traverse sowie die Magnethebekraft eines einzelnen Magneten angegeben werden.

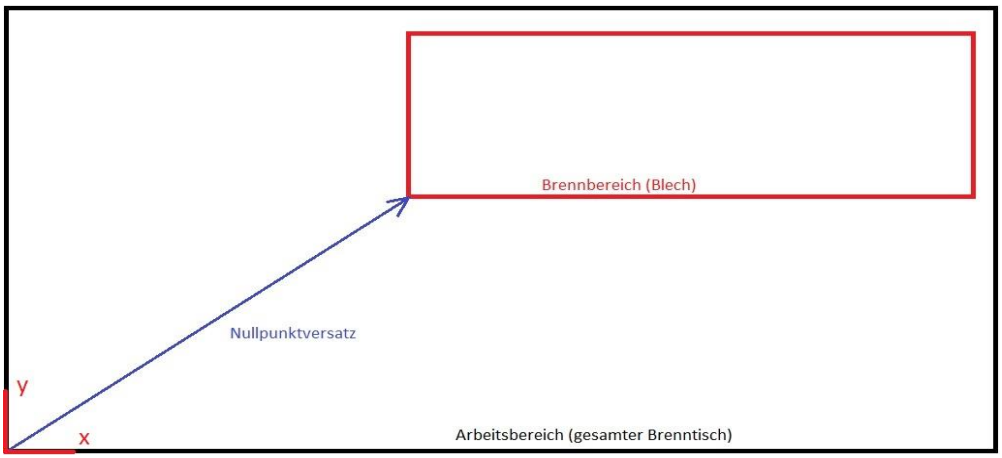

Abbildung 4.14: Lage des Brennbereiches im Arbeitsbereich

Der Nullpunktversatz gibt den Abstand der linken unteren Ecke des Brennbildes zur linken unteren Ecke des Arbeitsbereiches an, siehe Abbildung 4.14. Dieser wird aus der Brenndatei ermittelt, kann aber auch optional manuell abgeändert werden.

Durch die Betätigung der Schaltfläche *Daten übernehmen* wird die Auswertung der Brenndaten gestartet. Nach der Auswertung, mit Hilfe der in dem Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden, gelangt man anschließend zu den Ergebnisfenstern. Bis dieses Fenster erscheint, kann je nach Brennbildgröße und gewählten Maßstab unterschiedlich viel Zeit vergehen. Über die Schaltfläche *Abbrechen* gelangt der Benutzer zurück zum Startbildschirm.

4.3.3 Ergebnisfenster

Das Programm besitzt zwei Ergebnisfenster, die während des Programmablaufes auf dem Computerbildschirm nebeneinander dargestellt werden. Im rechten Fenster werden die für die Bauteile erhaltenen Daten in einer Tabelle zusammengetragen, siehe Abbildung 4.15. Diesen Daten umfassen unter anderem die Objekt-, Sektions- und Teilenummern, die Leitwege, die Teilegewichte sowie die, je nach Sortierstrategie ermittelte, Ablagefächer. Es besteht über die Schaltfläche *Tabelle exportieren* die Möglichkeit diese Daten, zusammen mit den im Eingabefenster gewählten Parametern der Magnettraverse, in eine Excel-Tabelle zu schreiben.

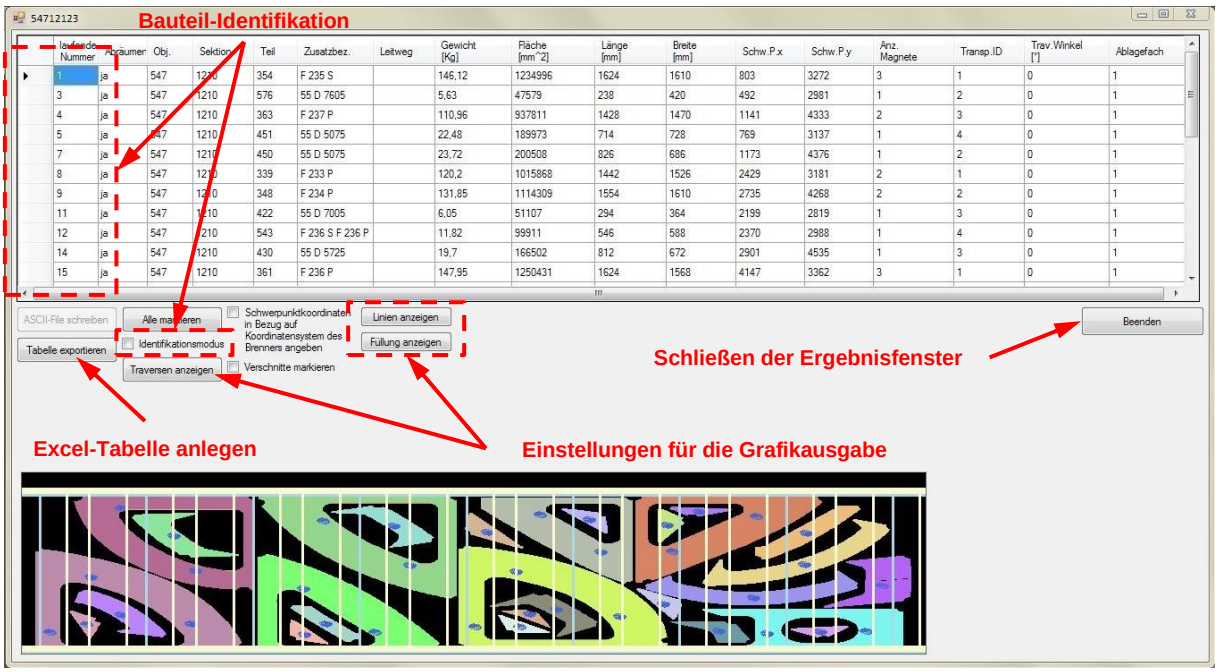

Abbildung 4.15: Kommentiertes rechtes Ergebnisfenster

Zur Kontrolle dient zusätzlich eine Grafikausgabe des Pixelrasters. Abhängig vom Verhältnis der Längenausdehnungen des Brennbereiches erfolgt die Visualisierung entweder in den gleichen Relationen von Breite zu Höhe oder in verzerrter Form. Ausschlaggebend dafür ist der zur Verfügung stehende Platz für die Ausbreitung des Anzeigefensters. Standardmäßig zeigt die Grafik die Traversenpositionen aller Hübe und die zugehörigen Magnetpositionen an. Setzt man den Haken bei *Identifikationsmodus* und wählt in der linken Spalte der Tabelle

ein Bauteil aus, wird dieses Bauteil in der Grafik durch ein grünes Rechteck umrandet und dessen Schwerpunkt angezeigt. Weiterhin kann über die Schaltfläche *Linien anzeigen* die aus der Brenndatei eingelesene Kontur dargestellt werden. Die darunter liegende Schaltfläche *Füllung anzeigen* hebt die Schrottmaske rot hervor. Über die Schaltfläche *Traversen anzeigen* gelangt man zur Darstellung der Ausgangsgrafik zurück.

Die Schaltfläche *Beenden* schließt die Ergebnisfenster und öffnet das obere Startfenster. Dabei werden die ermittelten Daten verworfen und es kann erneut eine Brenndatei eingelesen werden.

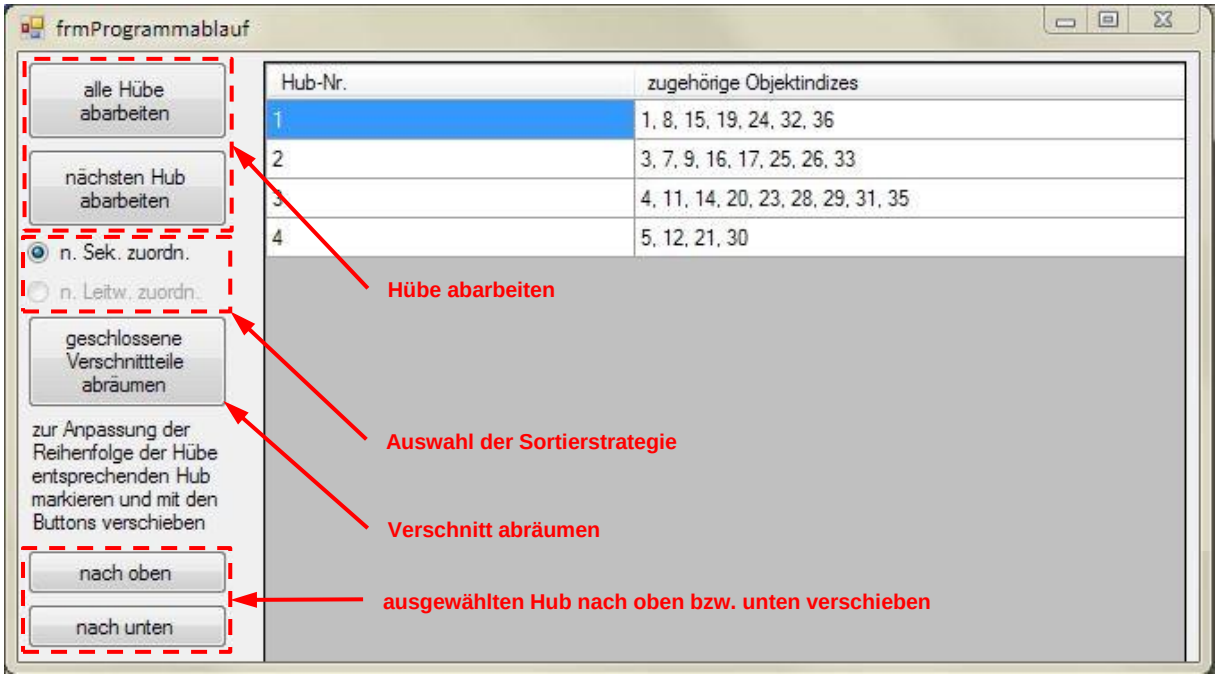

Abbildung 4.16: Kommentiertes linkes Ergebnisfenster

Im zweiten Ergebnisfenster werden die Informationen zu den ermittelten Hüben dargestellt, siehe Abbildung 4.16. In der Tabelle sind die Hübenummern mit den laufenden Nummern der zugehörigen Bauteile angegeben. Die Zuordnung der Bauteile zu den Hüben ist von der Sortierstrategie unabhängig. Als Strategien stehen das Sortieren nach Sektionen und das Sortieren nach Leitwegen zur Verfügung. Sind für eine Strategie keine Daten vorhanden, wird die entsprechende Schaltfläche ausgegraut. Änderungen an der Reihenfolge der Hübe können über die beiden unteren linken Schaltflächen vorgenommen werden.

Durch Betätigung der *Schaltfläche alle Hübe abarbeiten* werden alle Hübe in einem Schritt ausgeführt und damit alle mit der flexiblen Traverse handhabbaren Teile abgeräumt und in den entsprechenden Ablagefächern abgelegt. Die Schaltfläche *nächsten Hub abarbeiten* hingegen führt nur den nächsten Hub entsprechend der Reihenfolge aus. Das Abräumen der Verschnitte, ohne der umgebenen Schrottmaske, kann nach dem Abarbeiten aller Hübe der Tabelle über die Schaltfläche *geschlossene Verschnitte abräumen* erfolgen.

5 Entwicklung Versuchsstand

Zum Nachweis der prinzipiellen Funktionsfähigkeit des neuartigen Traversenkonzeptes sind für exemplarische Brennteilen Sortierversuche mit einem Funktionsmuster durchzuführen. Dieses Kapitel beschreibt den dafür im Rahmen des Vorhabens entwickelten Versuchstand. Dabei wird auf die Hard- und Softwarekomponenten sowie die Verknüpfung dieser zu einem Gesamtsystem eingegangen.

5.1 Funktionsmuster der flexiblen Magnettraverse

Für den prinzipiellen Nachweis der Funktionsfähigkeit wurde im Vorhaben ein Funktionsmuster der flexiblen Magnettraverse unter Einbeziehung der technischen Ausstattung der Forschungsstelle entwickelt. Im Folgenden wird dessen Aufbau näher erläutert.

5.1.1 Aluminium-Rahmen und linear Achsen

Das Funktionsmuster ist in der Versuchshalle des Antragstellers an einem Roboter, Kuka KR500L340, angeschlossen. Daraus ergeben sich Anforderungen an das Gewicht und die Abmaße der Traverse. Der Roboter besitzt bei der Verwendung einer Armverlängerung, für eine größere Reichweite, eine maximale Traglast von 340kg. Durch die Verwendung von Aluminiumprofilen für die Konstruktion der Traverse ergibt sich ein Traversengewicht von etwa 170kg, einschließlich aller Anbauteile. Damit beträgt die roboterseitige Bauteilgewichtsobergrenze ebenfalls 170kg. Die Abmaße des Funktionsmusters werden zu 2m x 1,6m gewählt, um eine ausreichende Beweglichkeit der Traverse im Arbeitsraum des Roboters zu gewährleisten.

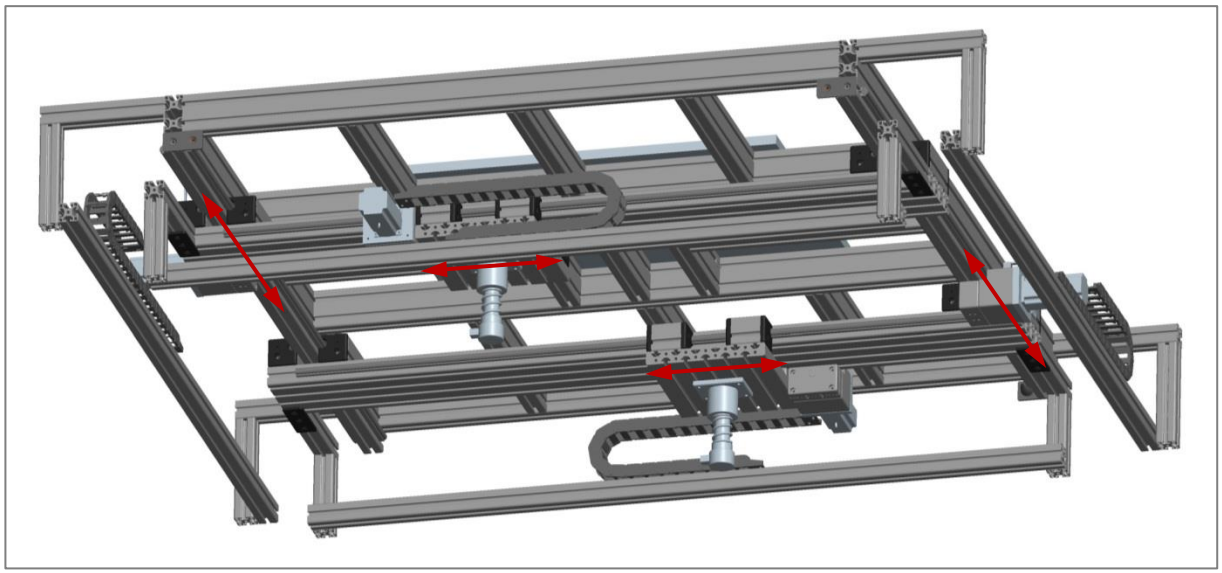

Abbildung 5.1: CAD-Modell des Funktionsmusters

Alle Komponenten des Rahmens der Traverse stammen von der Firma item Industrietechnik GmbH. Auf diesem Rahmen sind Linearachsen montiert. Die für die konstruktive Auslegung notwendigen CAD-Daten der Komponenten konnten von der Website der Firma bezogen werden. Aus den Einzelkomponenten wurde dann schrittweise der Rahmen des Funktionsmusters im CAD-Programm erstellt. Auf dieser Grundlage wurde eine Stückliste generiert und die Bauteile passgenau bei der Firma item Industrietechnik bestellt. Der Rahmen der Traverse wurde montiert geliefert. Die Linearachsen ermöglichen eine unabhängige Bewegung der Magnete über den gesamten Bereich der Traverse, siehe Abbildung 5.1. Damit bei einem Fehler in der Steuerung die Achsen nicht ineinander oder über die Enden der Traverse hinaus fahren, sind Anschläge mit Gummipuffern vorgesehen.

5.1.2 Antriebs- und Steuerungstechnik

Beim Funktionsmuster kommen die in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Schrittmotoren aufgrund ihres preislichen Vorteils sowie aufgrund der einfacheren Ansteuerung gegenüber Servomotoren zum Einsatz. Da bei dem Funktionsmuster das Gesamtgewicht aufgrund der Traglastbegrenzung des Roboters eine wichtige Rolle spielt, wurden Motoren der Baureihe 23S21 von der Jenaer Antriebstechnik ausgewählt, siehe Abbildung 5.2. Sie zeichnen sich durch eine sehr leichte und kompakte Bauweise aus. Für die Ansteuerung der Motoren ist zusätzlich ist ein Schrittmotorverstärker, hier der ECOSTEP®54, notwendig. Mit dem ECOSTEP®54 können alle vier Schrittmotorachsen via RS232 betrieben sowie eine hohe Positioniergenauigkeit und ein sanfter Motorlauf gewährleistet werden. An der Traverse sind insgesamt sieben kapazitive Endlageschalter der Firma item Industrietechnik angebracht, um die Verfahrwege der Linearachsen zu begrenzen.

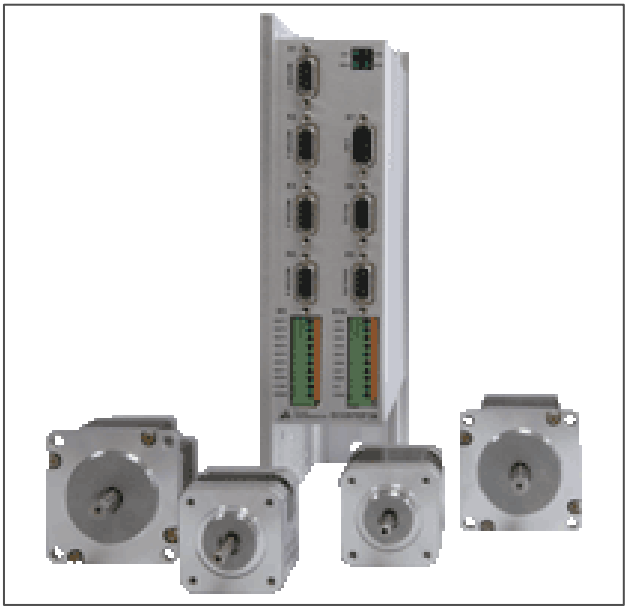

Abbildung 5.2: Motoren und Steuergerät der Firma Jenaer Antriebstechnik GmbH, [13]

5.1.3 Elektromagnete

Die Magnete des Funktionsmusters stammen von MAGNET-SCHULTZ GmbH & Co. Es handelt sich dabei um zwei Elektromagnete mit einem Durchmesser von je 50mm, siehe Abbildung 5.3. Die Reduzierung des Magnetdurchmessers gegenüber dem in Kapitel 3.1 festgelegten Wert von 100mm erfolgte zum einen aus Gewichtsgründen. Zum anderen reicht die Traglast von 10,8kg der ausgewählten Magnete aus, um alle Musterbleche des Versuches anzuheben. Die Traglast wird nach der Formel (3.2) mit einer Abreißkraft von 0,3kN berechnet. Für das Schalten der Magnete werden die digitalen Ausgänge des ECOSTEP®54 verwendet.

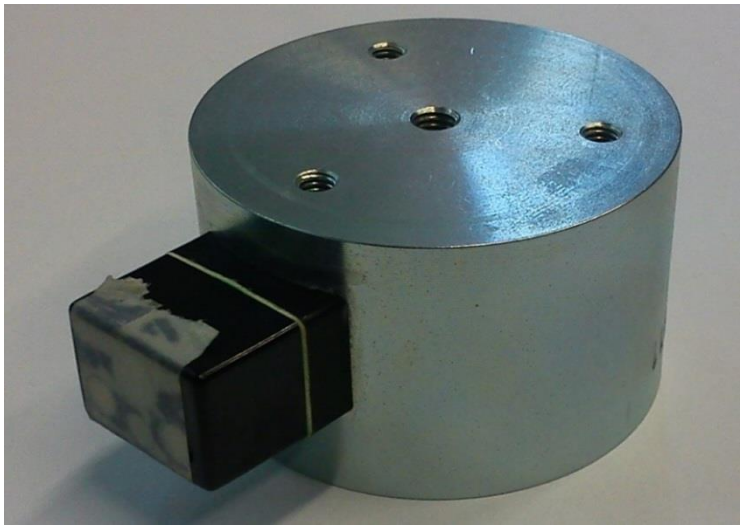

Abbildung 5.3: Elektromagnet des Funktionsmusters

Um die Magnete beim Aufsetzen auf die Bauteile zu entlasten und um beim Heben eines Bauteils mit mehreren Magneten einen eventuellen Höhenunterschied zwischen den einzelnen Magnetpositionen auszugleichen, werden die Magnete federnd an der Traverse angebracht, siehe Abbildung 5.4.

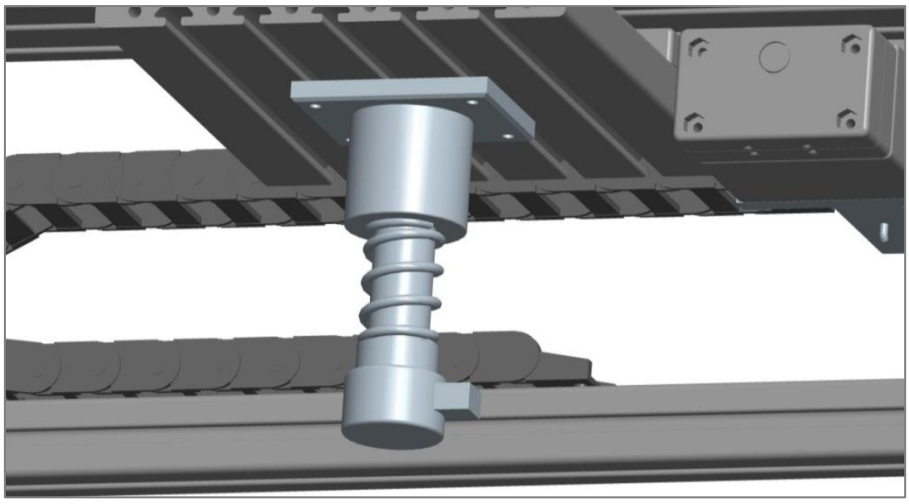

Abbildung 5.4: Federnde Anbringung der Magnete

5.2 Aufbau des Versuchsstandes

Zum Nachweis der prinzipiellen Funktionsfähigkeit des neuartigen Traversenkonzeptes wurde das Funktionsmuster an einen bei der Forschungsstelle vorhandenen Roboter, Kuka KR500L340, angeschlossen, siehe Abbildung 5.5. Bei der Anordnung des Sortierplatzes und der Ablagefächer des Versuchsstandes musste insbesondere auf den durch die Traverse eingeschränkten Arbeitsraum des Roboters geachtet werden. Daher ist im Versuchsaufbau nur eine Ablagefläche vorhanden. Diese ist aber für das sortierte Ablegen in mehrere Teilbereiche unterteilt.

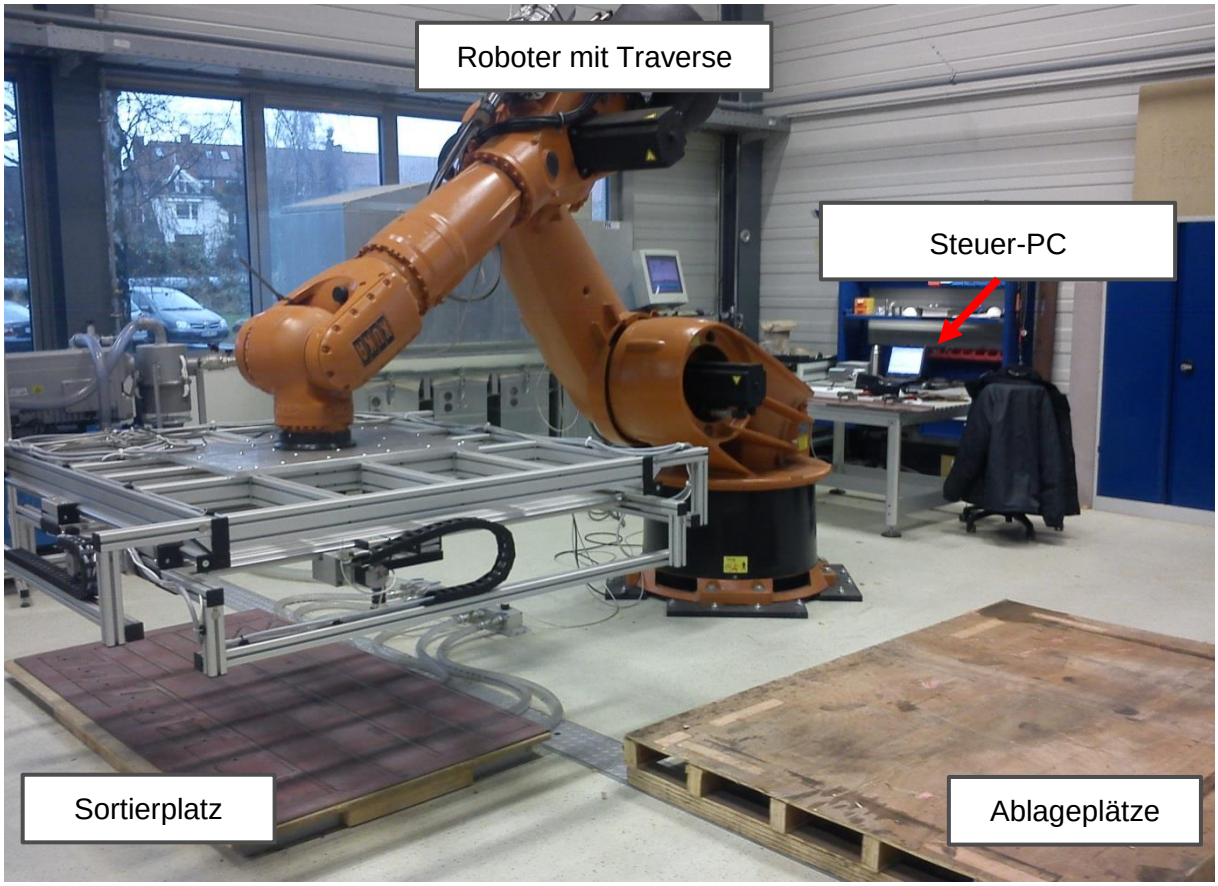

Abbildung 5.5: Versuchsstand im Versuchsfeld der Forschungseinrichtung

Nach dem Aufbau des Versuchsstandes wurden die Komponenten,

- Schrittmotorverstärker, samt
  - Schrittmotoren
  - Elektro-Magnete
  - Endlagenschalter
- Roboter,

mit dem Steuer-PC verknüpft. Die Abbildung 5.6 zeigt schematisch die Verknüpfung der Anlagenkomponenten. Die Kommunikation mit den Komponenten der Traverse erfolgt über

den Ecostep®54. Durch die Anordnung des Schrittmotorverstärkers auf der Traverse muss neben den Kabeln zur Stromversorgung nur ein Datenkabel über den Roboter zur Traverse geführt werden.

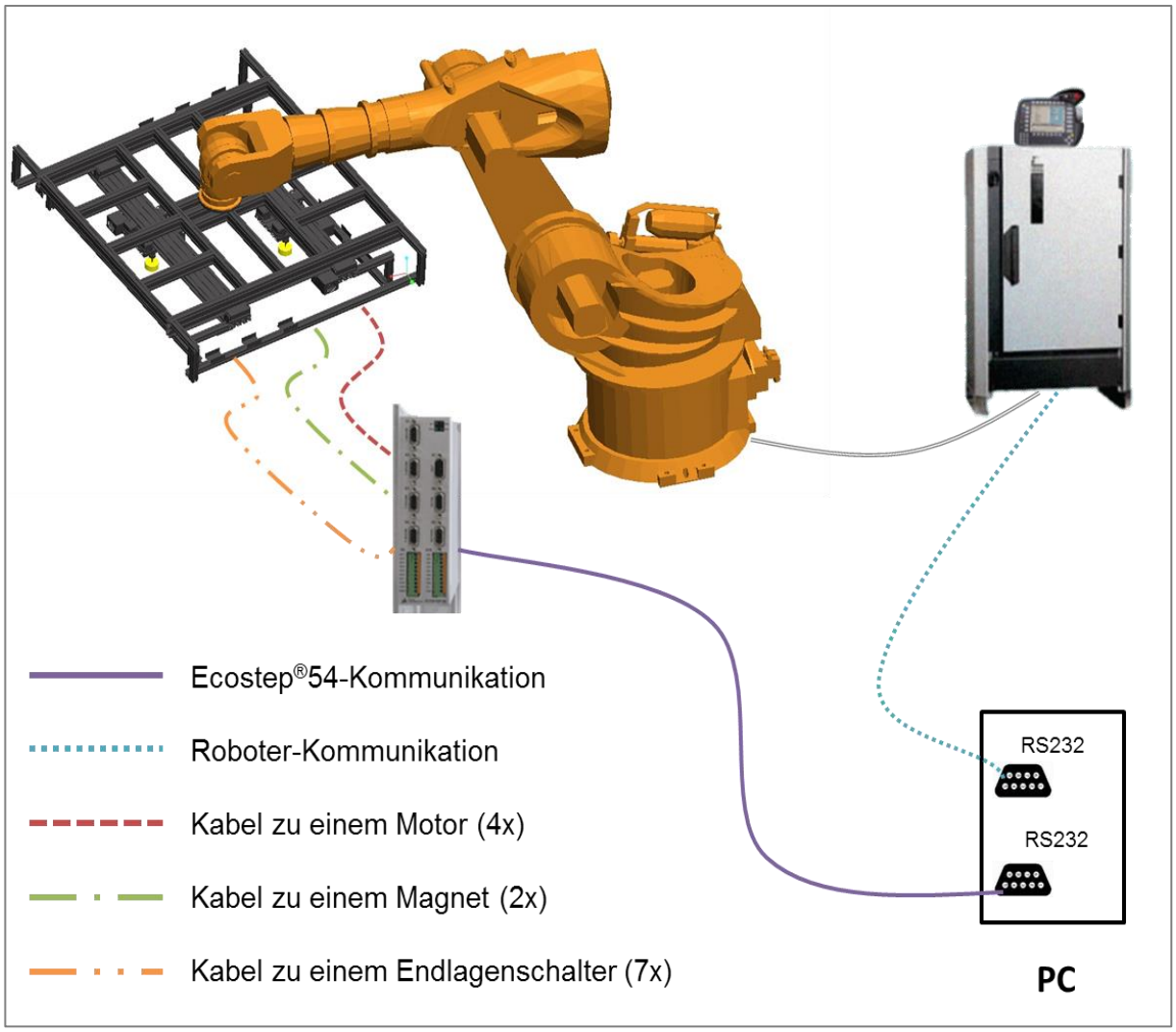

Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Verknüpfung der Anlagenkomponenten

5.3 Exemplarische Sortierversuche

Nach dem der Versuchsstand sowohl seitens der Hardware als auch der Software aufgebaut wurde, sind die Sortierversuche durchgeführt worden. Während der ersten Testläufe wurden noch einfache Bauteilgeometrien, rechteckige Bleche, verwendet. Für die Durchführung der Sortierversuche wurde ein von der Firma Ostseestaal GmbH zur Verfügung gestelltes Musterblech verwendet.

5.3.1 Musterblech

Die Komponenten des Funktionsmusters und der eingeschränkte Arbeitsraum des Roboters liefern die Anforderungen an die exemplarischen Brennteile für die Sortierversuche. In der Tabelle 5.1 sind diese zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Anforderungen an das Musterblech

Eigenschaft	Anforderung
maximale Abmaße des Brennbildes	2000mm x 1000mm
Naht-Kontur	I-Naht
maximales Teilegewicht, je ein bzw. zwei Magnete	10,8kg bzw. 21,6kg
minimaler Teiledurchmesser	50mm
Markierung	für jedes Bauteil Objektnummer und Leitweg

Ausgehend von diesen Anforderungen erstellte die Firma Ostseestaal GmbH das in der Abbildung 5.7 dargestellte Musterblech. Das Brennbild enthält fünf verschiedene Bauteilgeometrien und insgesamt 30 Bauteile. Die vorhandenen Brennbrücken wurden manuell vor dem Abräumen entfernt.

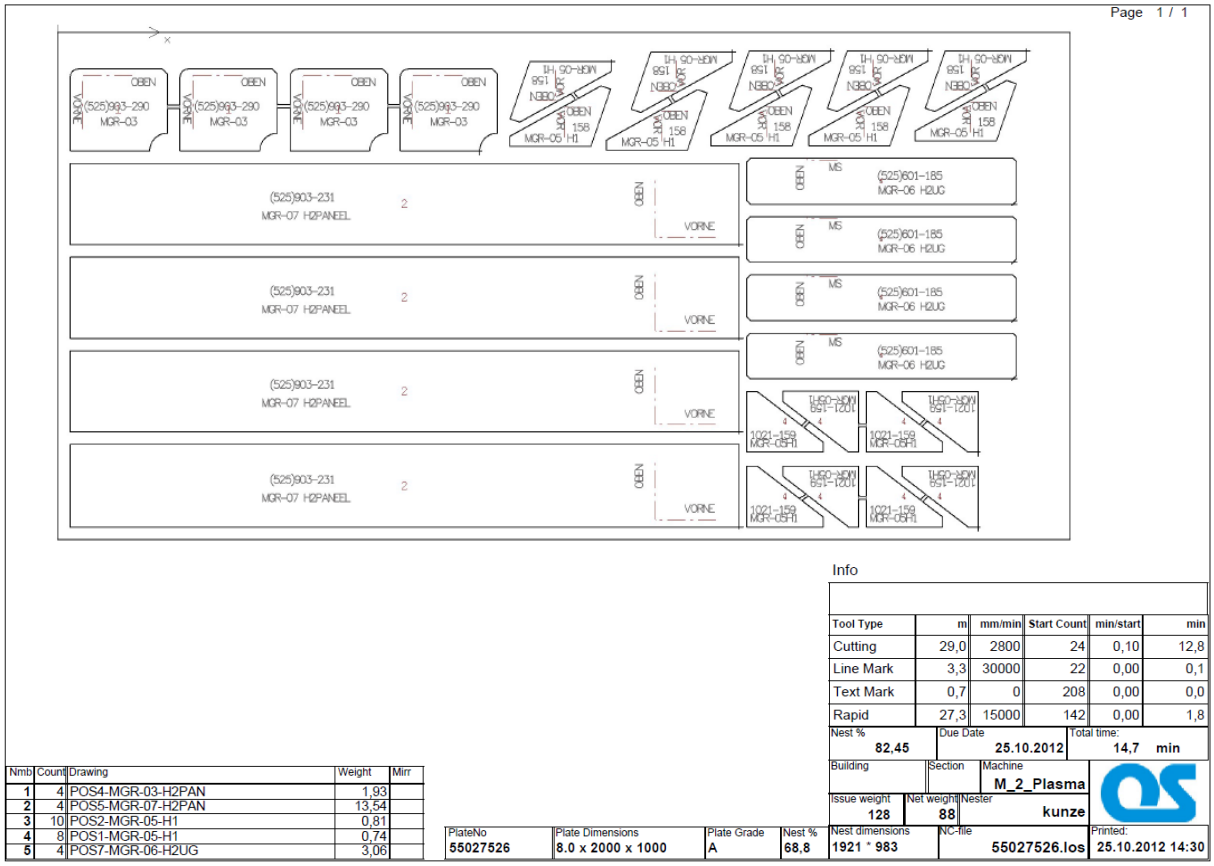

Abbildung 5.7: Musterblech der Firma Ostseestaal GmbH

5.3.2 Versuchsergebnisse

Durch die Auswertung der Brenndatei wird die in Abbildung 5.8 dargestellte Anordnung der Bleche erhalten. In der Abbildung ist jedes erkannte Blech durch eine andere Farbe hervorgehoben.

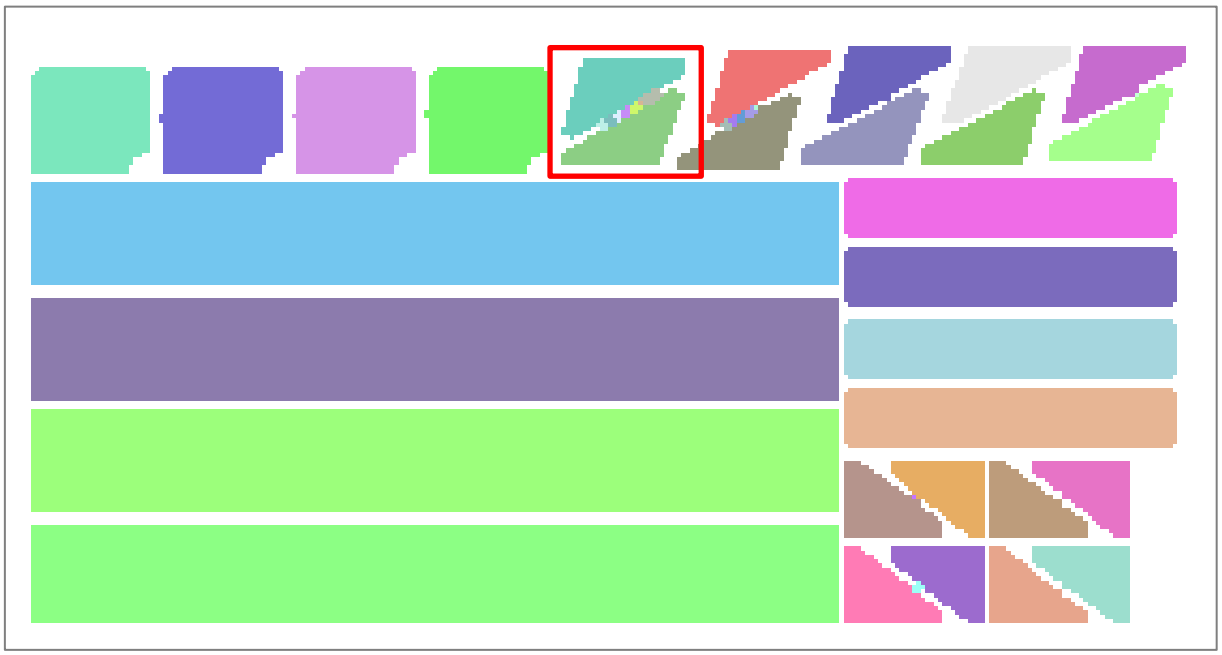

Abbildung 5.8: Erkannte Bauteile des Musterbleches

Es ist zu erkennen, dass zwischen einigen, nahe beieinander liegenden Bauteilen zusätzlich kleine Flächen irrtümlich als Bleche erkannt werden. Dieser Fehler wird durch die simplifizierte Darstellung des Brennbildes über einen Maßstab in einem Pixelraster hervorgerufen. Wenn zwei Randkonturen nahe beieinander liegen, kann dies zu Einschlüssen von wenigen Pixeln führen, siehe Abbildung 5.9. Das Programm sortiert diese nicht realen Bleche durch Abgleich ihres Flächeninhaltes mit dem Flächeninhalt eines Magneten aus. Alle Teile die kleiner als der Flächeninhalt des Magneten sind, werden zwar ausgewertet, aber nicht mit der Traverse gehoben.

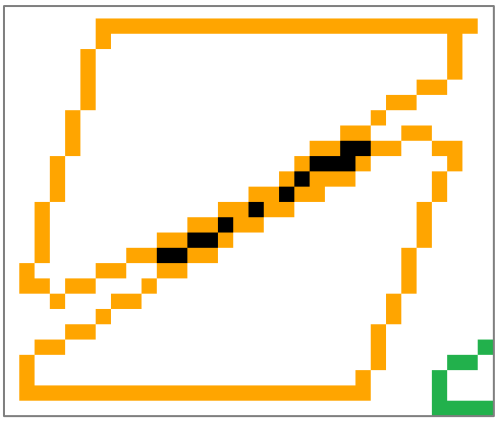

Abbildung 5.9: Fehler beim Einlesen der Konturen

Zur Ermittlung der Objektnummern und Leitwege wird zusätzlich die Markierdatei ausgewertet. In der Tabelle 5.2 sind die für die Bauteile erhaltenen Daten aufgeführt.

Tabelle 5.2: Erhaltene Bauteil-Daten aus Brenn- und Markierdatei

laufende Nummer	Objekt	Sektion	Bauteil-geometrie	Leitweg	Gewicht [kg]	Anz. Magnete	Ablagefach nach	
							Leitweg	Sektion
1	100	901	2	525..001.SB	16,80	2	1	1
2	100	901	2	525..001.SB	17,53	2	1	1
3	100	901	2	525..001.SB	17,53	2	1	1
4	100	901	2	525..001.SB	17,53	2	1	1
5	100	902	1	525..002.SB	2,61	1	2	2
6	100	902	1	525..002.SB	2,62	1	2	2
7	100	902	1	525..002.SB	2,62	1	2	2
8	100	902	1	525..002.SB	2,62	1	2	2
9	100	902	3	525..003.SB	1,06	1	3	2
10	100	902	3	525..003.SB	1,19	1	3	2
18	100	902	3	525..003.SB	1,09	1	3	3
19	100	902	3	525..003.SB	1,09	1	3	3
25	100	902	3	525..003.SB	1,14	1	3	3
26	100	902	3	525..003.SB	1,15	1	3	3
27	100	903	4	525..003.SB	1,04	1	3	3
28	100	903	4	525..003.SB	1,08	1	3	3
29	100	903	5	525..001.SB	4,21	1	3	3
30	100	903	5	525..001.SB	4,21	1	3	2
31	100	903	5	525..001.SB	4,21	1	3	2
32	100	903	5	525..001.SB	4,21	1	3	3
33	100	903	4	525..003.SB	1,03	1	3	3
34	100	903	4	525..003.SB	1,00	1	3	3
37	100	902	3	525..003.SB	1,10	1	3	3
38	100	902	3	525..003.SB	1,18	1	3	3
39	100	903	4	525..003.SB	1,00	1	3	2
40	100	903	4	525..003.SB	1,05	1	3	2
41	100	903	4	525..003.SB	1,06	1	3	3
42	100	903	4	525..003.SB	1,01	1	3	3
43	100	902	3	525..003.SB	1,13	1	1	3
44	100	902	3	525..003.SB	1,15	1	1	3

Das exemplarische Brennbild enthält insgesamt 30 Bleche. Es werden aufgrund von fehlerhaften Einschlüssen, Ursache auf Seite 48 beschrieben, weitere Flächen als Teile erkannt. Dadurch ergibt sich eine Gesamtanzahl von 44 Blechen. Die Daten dieser zusätzlichen Fehlerflächen sind in der Tabelle 5.2 nicht mit aufgelistet, da sie vom Programm aussortiert und von der Traverse nicht gehoben werden. Vier der Bleche müssen aufgrund ihrer Masse mit zwei Magneten gehoben werden, für alle anderen ist das Heben mit einem Magnet möglich.

Durch die Auswertung des Brennbildes in einem, durch einen Maßstab vereinfachten, Pixelraster kommt es bei der Ermittlung der Bauteilmassen zu Abweichungen zwischen dem realen und dem mit der Software bestimmten Wert. Bei dem im Versuch verwendeten Maßstab von 70, die Pixelkantenlänge beträgt 7mm, ergeben sich die in der Tabelle 5.3 dargestellten Abweichungen. Da bei der Ermittlung der Massen, siehe Kapitel 4.2.6 auf Seite 29, die Randpixel miteinbezogen werden, ergeben sich in jedem Fall zu große Massen, wodurch die Berechnungen auf der sicheren Seite liegen. Für das Bauteil des Musterbleches mit der kleinsten Abweichung ergibt sich ein um 24% erhöhter Wert.

Tabelle 5.3: Vergleich der Bauteilmassen

Bauteilgeometrie	reales Gewicht		minimal ermitteltes Gewicht	
	[kg]	%	[kg]	%
1	1,93	100,0	2,61	135,2
2	13,54	100,0	16,80	124,1
3	0,81	100,0	1,06	130,9
4	0,74	100,0	1,00	135,1
5	3,06	100,0	4,21	137,6

Für das Sortieren nach Sektionsnummern bzw. Leitwegen wurden diese Bezeichnungen an die Anzahl der Ablagefächer im Versuchstand angepasst. Da drei Ablagefächer vorhanden sind, wurden drei unterschiedliche Sektionsnummern und drei unterschiedliche Leitwege definiert. In der Tabelle 5.4 sind die den jeweiligen Sektionen und in der Tabelle 5.5 die den jeweiligen Leitwegen zugeordneten Teileanzahlen angegeben. Bei der Sortierung nach Sektionsnummern ordnet das Programm momentan die erste gefunden Nummer dem ersten Ablagefach zu. Die zweite Sektionsnummer wird dem zweiten Ablagefach und alle weiteren Nummern dem dritten Fach zugeordnet. Die Bleche werden dafür nach ihren laufenden Nummern aufsteigende ausgewertet. Das Sortieren nach Leitwegen erfolgt auf die gleiche Art. Für die Anwendung auf einer Werft ist eine feste Zuordnung der Sektionsnummern und Leitwege zu entsprechenden Ablagefächern vorzunehmen.

Tabelle 5.4: Teileanzahl je Sektion

Sektion	Teileanzahl
901	4
902	14
903	12

Tabelle 5.5: Teileanzahl je Leitweg

Leitweg	Teileanzahl
525..001.SB	8
525..002.SB	4
525..003.SB	18

Theoretisch könnten alle Bleche des Brennbildes mit 17 Hüben, vier Hübe mit zwei Magneten pro Bauteil und 13 Hübe mit je einem Magneten pro Bauteil, abgeräumt werden. Unabhängig von der Sortiervariante erhöht sich die Anzahl der Hübe auf 18, da die letzten beiden Bauteile zu nahe bei einander liegen, um beide Magnete über ihren Schwerpunkten zu platzieren. In der Abbildung 5.10 sind die Reihenfolge des Abräumens und die den Bauteilen zugeordneten Ablagefächer dargestellt.

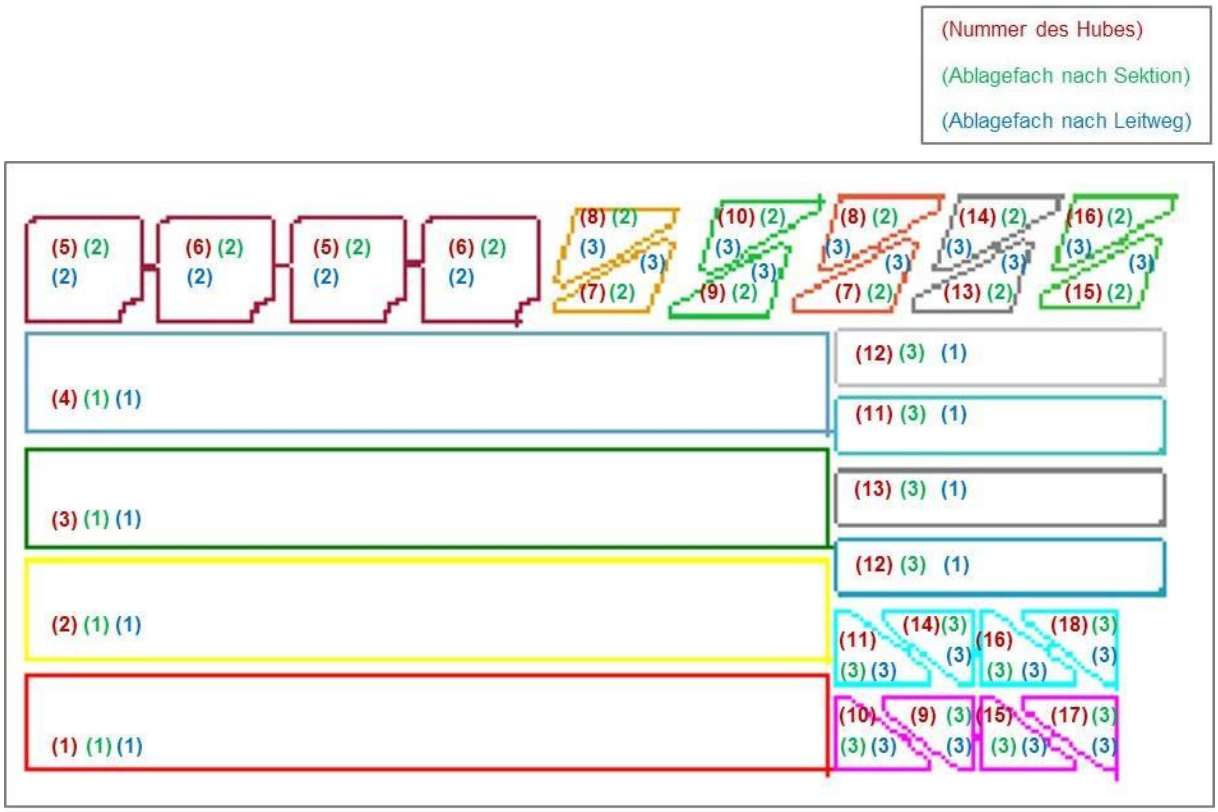

Abbildung 5.10: Reihenfolge des Abräumens und Zuordnung der Ablagefächer

Mit dem entwickelten Funktionsmuster einer neuartigen Magnettraverse konnte das Brennbild für beide Sortierstrategien abgeräumt werden, siehe Abbildung 5.11. Dabei zeigte sich, dass die ausgewählten Schrittmotoren nicht ausreichend dimensioniert sind. Ihr Haltemoment reicht nicht aus um die Magneten während der Fahrt sicher in ihrer Position zu halten. Aufgrund der Trägheit der beweglichen Massen auf der Traverse traten bei den ersten Versuchen Schrittverluste bei den Motoren auf. D. h. die Schrittmotoren wurden durch die externen Lastmomente überlastet und ihre Rotoren konnten dem Drehfeld nicht mehr folgen. Ein Schrittverlust führte dazu, dass die Information über die aktuelle Position des Rotors verloren geht. Dadurch entstanden Ungenauigkeiten in der Positionierung der Magnete. Abhilfe schaffte eine Absenkung der Beschleunigungswerte des Roboters. Mit dieser Konfiguration ist es möglich die 30 Bleche des Brennbildes in 15 Minuten abzuräumen. Für die Entwicklung einer serienreifen Traverse wird die Verwendung von größer dimensionierten Motoren oder mechanischen Bremsen für die Linear-Achsen empfohlen.

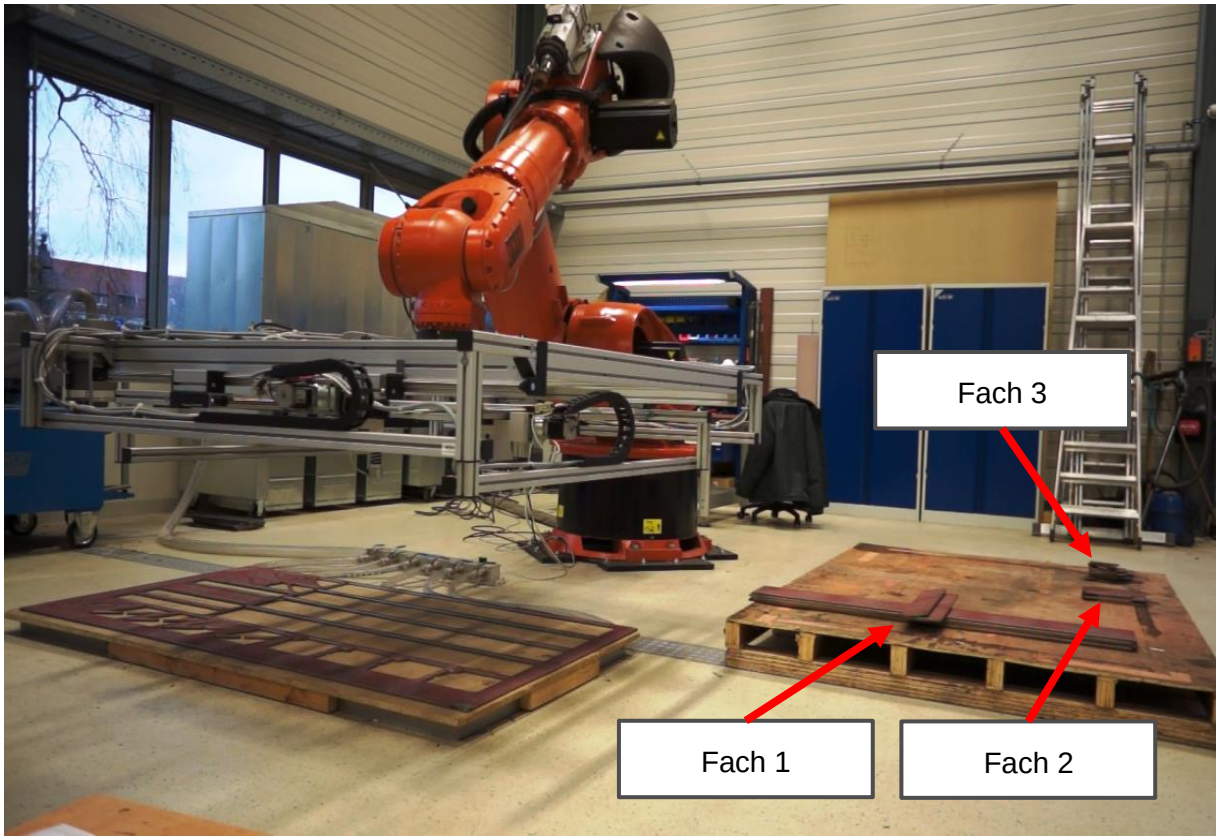

Abbildung 5.11: Abräumen des exemplarischen Brennbildes

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, ein System zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen nach dem Blechzuschnitt zu entwickeln. Es konnte gezeigt werden, dass eine Realisierung des flexiblen und firmenspezifisch adaptierbaren Systems auf Grundlage der NC-Daten des Brennplans und der speziellen Anforderungen des jeweiligen Anwenderbetriebes möglich ist. Für das Erreichen des Forschungszieles waren Untersuchungen und Entwicklungen in folgenden drei Bereichen notwendig:

- Angestrebt wurde die Entwicklung und Erprobung eines neuen Verfahrens für das automatisierte Abräumen und Vereinzeln von Brenn- und Schrottteilen nach dem NC-Plattenzuschnitt. Das entstandene Anlagenkonzept sollte in einer Simulationsumgebung untersucht werden, einschließlich der Sortier- und Ablageverfahren. Weiterhin war es technisch und wirtschaftlich zu bewerten.
- Für die sichere Handhabung und Vereinzelung der Bauteile war eine spezielle Magnettraverse zu entwickeln, welche aus Elektromagneten, die durch ein übergeordnetes Rechnersystem automatisch ansteuerbar sind, bestehen sollte. Für das sichere Aufnehmen von kleinen Brennschnitten war bei Verwendung geeigneter Elektromagnete, deren Größe, Abstand und Tragkraft zu ermitteln. Weiterhin sollten alternative Greiferkonzepte, wie Vakuumgreifer oder mechanische Klemmvorrichtungen, bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten untersucht werden.
- Der dritte Bereich umfasste die Entwicklung eines Software-Werkzeuges für die Identifikation und Lokalisation der Bauteile zur rechnerunterstützen Ansteuerung der Einzelmagnete sowie für die Berechnung der Sortierwege auf Basis der digital vorliegenden Daten aus dem Brennplan. Diese Software soll den kompletten Abräum- und Vereinzelungsprozess der zu automatisierenden Anlage steuern.

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden zunächst der derzeitige Abräumprozess und die an der Arbeitsstation vorliegenden Daten näher untersucht. Diese Analyse zeigte auf, welche Strategien zur Sortierung der gebrannten Teile angewendet werden sollten und welche Daten dafür genutzt werden können. Die Brenn-Dateien, welche von den NC-Maschinen verarbeitet werden, lagen bei allen untersuchten Werften im ESSI-Format vor, weshalb die entstandene Software momentan dieses Format verarbeiten kann.

Anschließend wurden die für die Umsetzung der neuartigen Traverse möglichen Greiferkonzepte analysiert. Es zeigte sich, dass die derzeitige Handhabung der Brennteile mit Elektromagnete wesentliche Vorteile gegenüber den alternativen Konzepten, Vakuumgreifer und mechanische Klemmvorrichtungen, aufweist.

Vor der Entwicklung neuer Verfahren zum automatisierten Abräumen und Vereinzeln von Brenn- und Schrottteilen mussten die vorhandenen bzw. zukünftig erwarteten Produktionsstrukturen analysiert werden. Damit die Ergebnisse dieser Analyse möglichst allgemeingültigen Charakter haben, wurden die Daten eines Standardcontainerschiffes (2800 TEU) ausgewertet.

Es zeigte sich, dass bei Verwendung von nur einem Werkzeug eine vollautomatische Lösung aufgrund des breiten Bauteilspektrums unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit nicht realisierbar ist. Daraus wurde abgeleitet, dass zum Handhaben aller Teile der verschiedenen Gewichtsklassen ein Gerätemix benötigt wird.

Von den entwickelten Anlagenkonzepten setzte sich unter Berücksichtigung von Funktions- und Kostenaspekten ein Konzept durch, bei dem kleine Bauteile bis 17kg manuell, mittlere Teile mit einer neuartigen flexiblen Magnettraverse und große Teile mit vorhandenen Großtraversen gehandhabt werden sollen. Die neuartige Traverse zeichnet sich dadurch aus, dass ihre Magneten einzeln schaltbar und mit Hilfe von Linearachsen zusätzlich einzeln positionierbar sind.

Im nächsten Schritt erfolgte die Entwicklung einer Software zur Steuerung des kompletten Abräum- und Vereinzelungsprozesses. Die Software beinhaltet Methoden und Algorithmen um das Einlesen und Auswerten von Brenn- und Markierdateien sowie die Bewegungsplanung des gesamten Anlagensystems zu ermöglichen.

Im letzten Abschnitt wurden für den Nachweis der prinzipiellen Funktionsfähigkeit des neuartigen flexiblen Traversenkonzeptes Sortierversuche mit exemplarischen Brennteilen durchgeführt. Dafür wurde ein Versuchsstand mit einem verkleinerten Funktionsmuster der Traverse entwickelt und aufgebaut. Schlussendlich erfolgte das Durchführen von Sortierversuchen an einem Musterbrennbild.

Insgesamt wurde das Ziel des Forschungsvorhabens erreicht. Unter Berücksichtigung der ermittelten Anforderungen an das neuartige Traversenkonzept konnten die Bauteile eines vorliegenden Musterbrennbildes abgeräumt und vereinzelt werden.

Aufbauend auf diesem Projekt sollten weitere Entwicklungsarbeiten durchgeführt werden, um das Anlagenkonzept zur Marktreife zu bringen:

Wie sich in den Sortierversuchen zeigte, ist das Haltemoment der gewählten Schrittmotoren nicht ausreichend gewesen, um einen genauen Betrieb unter den Bedingungen auf einer Werft zu gewährleisten. Eine Lösung des Problems wäre das Anbringen von mechanischen Bremsen an den Linearachsen der Traverse, die Auswahl von größer dimensionierten Motoren oder die Integration einer Positionsregelung in die Linearachsen.

Weiterhin muss die Funktionalität der Software erweitert werden. Beim Einlesen von Brenndateien sollte neben dem ESSI-Format auch das EI-Format (G-Code) unterstützt werden, da dieses ebenfalls auf den Werften weit verbreitet ist. Die Funktionalität des Abräumens kann auf die Schrottmaske, falls vom Gewicht her handhabbar, erweitert werden, um den gesamten Prozess noch weiter zu automatisieren. Ein wesentlicher Punkt ist die Beachtung der Nahtvorbereitung. Bei schrägen Schnitten, V-Nahtvorbereitung, kommt es zur Überlappung zwischen Bauteil und Verschnitt, wodurch gegebenenfalls zuerst der Verschnitt abgeräumt werden muss. Momentan kann das Programm nur für das Brennen mit geraden Schnitten oder mit einer Orientierung der schrägen Schnitte, bei der zuerst die Brennteile und dann der Verschnitt gehoben werden muss, verwendet werden. Der Aufwand besteht hier in der Weiterentwicklung des Programmteils zum Einlesen und Auswertung der Brenn-dateien.

Literaturverzeichnis

[1] D. J. Eyres, Ship construction, 6. Hrsg., Oxford: Elsevier Ltd., 2007.

[2] „Anwendungen im Schiff- und Bootsbau," Demag Cranes & Components GmbH, [Online]. Available: http://www.demagcranes.de/cms/site/deutschland/page18086.html. [Zugriff am 15. 01. 2013].

[3] Lerche und Haak, „Werftmodernisierung mit neuen Schiffbautechnologien," *DVS-Bericht Band 194,* 1998.

[4] „Produktinformationen Rundmagnete," Demag Cranes & Components GmbH, [Online]. Available: http://www.demagcranes.de/cms/site/deutschland/page3566.html. [Zugriff am 07. 01. 2013].

[5] H. Martin, Transport- und Lagerlogistik, 5. Hrsg., Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2004.

[6] „Produktionformationen Greifklemmen," Lange-Hebetechnik e. K., [Online]. Available: http://www.lange-hebetechnik.de/produkte/lastaufnahmemittel/greifklemmen.html. [Zugriff am 14. 01. 2013].

[7] „Innovative Vakuum-Handhabung in der Photovoltaik-Produktion," J. Schmalz GmbH, [Online]. Available: http://de.schmalz.com/aktuelles/presse/vakuumkomponenten/01354/. [Zugriff am 14. 01. 2013].

[8] „Produktinformation Lasthebemagnete," MTindustry, [Online]. Available: http://www.mtindustry.de/c-778-magneten-hefmagneten.aspx. [Zugriff am 14. 01. 2013].

[9] E. Wiebeck, M. Beyrodt und . Z. Winkler, Technologie des Schiffskörperbaus, Berlin: VEB Verlag Technik, 1980.

[10] „Informationen rund um Magnetismus," IBS Magnet, [Online]. Available: http://www.ibsmagnet.de/knowledge/haftmagnete.php. [Zugriff am 14. 01. 2013].

[11] Demag Cranes & Components GmbH, „Produktübersicht Lasthebemagnete," 2009.

[12] „Informationen zur Arbeitssicherheit - Einsatz von Lasthebemagneten im Stahlhandel," Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution, [Online]. Available: http://medien-e.bghw.de/bge/pdf/r500_03.pdf. [Zugriff am 28. 01. 2013].

[13] „Produktinformationen Motoren," Jenaer Antriebstechnik GmbH, [Online]. Available: http://www.jat-gmbh.de/dt/produkte/mot/produkte_motoren.html. [Zugriff am 14. 01. 2013].

Liste der CMT-Berichte

Nr.	Titel	Jahr
1	Erschließung des hochfesten Stahls für den Schiffbau	2004
2	Erfassung der Schwingformen von starr gelagerten Hauptantriebsaggregaten durch Modalanalyse	2004
3	Entwicklung von Standardrohrhaltern für den Schiffbau	2004
4	Erhöhte Rationalisierungseffekte im Schiffskörperbau durch Laserstrahlschweißen teilangeschlossener T-Stöße	2004
5	Dynamische Analyse der hydroelastischen Eigenschaften kabelgebundener Tiefseegeräteträger	2004
6	curved panel II - Genaufertigung von zweiachsig gekrümmten Flächen- und Volumenbaugruppen aus Stahl - Fortsetzung	2004
7	Einfluss instationärer Betriebszustände auf die Lagerung von Propellerwellen	2006
8	Änderungsmanagement im schiffbaulichen Entwicklungsprozeß	2007
9	Vergleichende Untersuchungen der Schwingfestigkeit von Knieblechverbindungen	2007
9	Vergleichende Untersuchungen der Schwingfestigkeit von Knieblechverbindungen	2007
10	Entwicklung eines Programms zur Berechnung von Zurr- und Laschkräften auf RoRo-Schiffen	2007
11	GemaS - Gewichtsmanagementsystem in der Unikatfertigung hochausgerüsteter Spezialschiffe	2008
12	Vergleichende Untersuchungen verschiedener Verfahren zur NOx-Reduzierung auf Schiffen	2008
13	Fertigungs- und sicherheitstechnisch alternative Doppelhüllen-Konstruktionen im Tankerschiffbau	2008
14	Versteifte Plattenstrukturen im Stahlschiffbau	2009
15	Untersuchungen zu Unterbauten der Decksausrüstung und Ladungssicherung	2009
16	Festigkeit von mit großen Luftspalten verschweißten Stößen von Schiffssektionen	2010
17	Egas - Leistungssteigerung des Elektrogasschweißens von höherfesten Schiffbaustählen zum Einsatz bei Normal- und Tieftemperaturen	2011
18	Mekapro - Mechanische Kantenbearbeitung von Profilbeschnitten und Ausbränden im Schiffbau	2012
19	Bolzenschweißen - Schwingfestigkeit von Bolzenschweißungen in der tragenden Schiffskonstruktion	2012
20	MIG-Löten - Erhöhung der Verbindungsqualität von verzinkten Ausrüstungsstrukturen durch MIG-Löten	2013
21	BleSo - Entwicklung eines Verfahrens zum automatischen Abräumen und Vereinzeln von Bauteilen im Blechzuschnit	2013
22	Schiffsfenster - Große Fenster unter statischer oder dynamischer Beanspruchung an Bord von Schiffen	2013
23	Normdaten - Alters- und geschlechtsabhängige Referenzdaten (Normdaten) der körperlichen Leistungsfähigkeit von Wassersportlern bei Aktivitäten auf Motor- und Segelyachten	2013

Alle CMT-Berichte können beim CMT angefordert werden (Kontakt: igf@cmt-net.org).