

DIPLOMARBEIT

**Prozessoptimierte Steuerung
für eine
Spiegelschweißmaschine**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerfried Zeichen
betreuender Assistent

Dipl.-Ing. Dr. techn. Alois Zoitl
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (E376)

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Gustav Lehmerhofer
Matr.Nr.: 9825812

Schillerstraße 8
3550 Langenlois
ÖSTERREICH

Langenlois, 30.5.2008

Kurzfassung

Spiegelschweißmaschinen sind seit vielen Jahren in der Batterieindustrie zum Verschließen von Bleiakkumulatoren im Einsatz. Mit dieser Technik werden Batteriedeckel und Batteriekästen mithilfe eines Heizelementes, dem Spiegel, an den Kunststoffoberflächen gleichzeitig aufgeheizt und danach durch Druck miteinander verbunden. Für den industriellen Einsatz ist es notwendig, dass neben der erforderlichen Qualität der Schweißverbindung auch eine vorgegebene Taktzeit eingehalten wird, damit die Maschine im Verbund mit weiteren Automaten in einer Montagelinie die kostengünstige Batterieproduktion ermöglicht. Anlass für diese Diplomarbeit ist die mechanische Neukonstruktion einer solchen Spiegelschweißmaschine, die aus der Notwendigkeit erfolgt ist, die vorhandenen Produktionskapazitäten zu erhöhen und die Qualität des Produktes zu steigern.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Automatisierungslösung für den industriellen Produktionsbetrieb, welche durch Optimierung des Prozesses im Hinblick auf Produktqualität und Bedienbarkeit einen zuverlässigen Einsatz für die Serienproduktion gestattet.

Im ersten Schritt wird gezeigt, wie durch den Entwurf des kompletten Steuerungsprogrammes für die vorhandene *Simatic T-CPU* aus einem 4-Achssystem mit *Sinamics-Antrieben* eine funktionsfähige Spiegelschweißmaschine entsteht. Darauf aufbauend werden Untersuchungen am Schweißprozess selbst durchgeführt, wodurch Optimierungspotential identifiziert wird, um die bekannten Einschränkungen vergleichbarer Maschinen zu minimieren.

Zur Bedienung der Maschine wird ein *Human-Machine-Interface* eingerichtet, das durch ein grafisches *Touchpanel* die Steuerung und Parametrierung aller Detailfunktionen des Schweißprozesses in übersichtlicher Weise ermöglicht. Hier wurden neue Methoden entworfen, die die gesteigerte Informationsmenge in verbesserter Weise dem Bediener zugänglich machen. Gleichzeitig werden die Hauptfunktionen auf elektromechanische Bedienelemente verlagert, um einen einfachen und robusten Betrieb unabhängig vom grafischen Terminal zu sichern.

Durch den Einbau einer Reihe von Hilfsfunktionen zur Unterstützung von Einstellungs- und Servicearbeiten werden Stillstandszeiten minimiert, wodurch die Maschine für den industriellen Dauereinsatz geeignet ausgerüstet ist. Das bestätigt sich dadurch, dass die Spiegelschweißmaschine seit mehreren Wochen erfolgreich in der Serienproduktion eingesetzt wird.

Abstract

Hot plate welding is being used already for several years for the production of starter batteries. This technique uses the hot plate to melt the surfaces of battery case and lid, which are then pressed together to form a solid joint. Industrial use of such machinery requires both quality of the weld as well as short cycle times of the production process to enable cost effective battery production in conjunction with the other machines of the production line. The mechanical redesign of a battery production machine was used as an opportunity to start this work. This redesign was caused by the necessity of increasing production capacity and product quality.

The objective of this diploma thesis is the development of a control concept for an industrial hot plate welding machine. Basic investigations on this plastic welding machine aim at the construction of easy to use and reliable equipment that is optimized for high quality output in the industrial battery production.

It is shown how to build a fully functional machine by designing a control program for the existing Simatic T-CPU together with the connected Sinamics drive system consisting of 4 axes. Based on this program the investigation on the basic welding process takes place in order to identify potential for quality improvements.

For the operation of the machine it is necessary to design the Human Machine Interface by means of a Touch Panel such that control and parameter input of all of the functions can be achieved in a clear and easy way. New methods of interaction have been designed at this point to operate this new welding machine that can bring more information in an improved way to the user. At the same time all main functions can be carried out with electromechanical controls to make a robust operation possible that is independent of the graphic terminal.

With the installation of several assisting functions to help with adjustment and servicing of the machine necessary standstill can be minimized. Together with this the machine is fitted well for the uninterrupted production in the industrial field. That is confirmed with the successful operation of the hot plate welding machine for several weeks in the production field.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre Unterstützung zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Zu Beginn gilt mein besonderer Dank Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerfried Zeichen, der sich kurzfristig bereit erklärt hat die Begutachtung der bereits laufenden Diplomarbeit in fliegendem Wechsel zu übernehmen, sowie bei Dipl.-Ing. Dr. techn. Alois Zoitl, der mit beratendem Beistand zu nahezu unmöglichen Zeiten diese Arbeit mitgeformt hat.

Weiters gilt mein Dank Ing. Helmut Diewald, Chef der HDI Elektronik GmbH, für das in mich gesetzte Vertrauen zur Durchführung dieses Projekts, im Besonderen für seine Geduld gegenüber nicht so offensichtlich notwendigen Untersuchungen an der Maschine trotz der ohnehin knapp bemessenen Terminplanung.

Des Weiteren gilt mein Dank dem Kunden des beschriebenen Produktes, der an dieser Stelle nicht genannt werden möchte, für die bereitwillige Kooperation zur Veröffentlichung der hier verwendeten Daten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Partnerin Monika bedanken für die Vermittlung von Kraft und Motivation dieses Studium zu einem Ende zu führen.

Inhalt

Kurzfassung	i
Abstract	ii
Danksagung.....	iii
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Rahmenbedingungen	3
1.3 Leitfaden	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Industrielle Batterieproduktion.....	5
2.1.1 Vorarbeiten	7
2.1.2 Montagelinie.....	7
2.1.3 Produktionsabschluss.....	8
2.2 Prozess Deckelschweißen.....	9
2.3 Mechanik und Antrieb	10
2.3.1 Batteriekastenzuführung	11
2.3.2 Spiegelpositionierung	12
2.3.3 Deckelzuführung.....	13
2.4 Steuerung und Bedienung.....	13
2.4.1 Buskommunikation.....	13
2.4.2 Benutzerschnittstellen.....	14
2.4.3 Software.....	14
2.4.4 Sicherheitstechnik.....	15
3 Prozessbedingungen für das Steuerungskonzept	16
3.1 Grundlagen für das Heizelementschweißen.....	16
3.1.1 Anwärmphase	18
3.1.2 Umstellphase.....	19
3.1.3 Fügephase	20

3.2	Bewegungsanalyse für Linearantriebe	22
3.3	Grundlagen für Servoantriebe.....	24
3.3.1	Definition und Einteilung der Servoantriebe.....	25
3.3.2	Modellierung eines Riemenantriebes	26
3.3.3	Modellierung eines horizontalen Spindelantriebes.....	27
3.3.4	Modellierung der vertikalen Spindelantriebe	28
3.4	Qualitätskriterien.....	29
3.4.1	Einstellungskriterien	29
3.4.2	Stichprobenuntersuchung.....	30
3.4.3	In - Prozessmessung.....	30
4	Maschinenbedingungen für das Steuerungskonzept	32
4.1	Heizungsregelung.....	32
4.1.1	Heizelement	32
4.1.2	Temperaturregler	35
4.1.3	Heizleistung.....	36
4.2	Servoantriebe.....	36
4.2.1	Umrichterelektronik.....	36
4.2.2	Besonderheiten der Kaskadenregelung	38
4.3	Hilfsantriebe.....	39
4.3.1	Elektrisch versorgte Hilfssysteme	39
4.3.2	Pneumatisch versorgte Hilfssysteme.....	41
4.4	Bedienschnittstelle	44
4.4.1	Externe Bedienelemente	44
4.4.2	Bedienelemente im Schaltschrank	45
4.4.3	Bedienerschrank.....	46
4.4.4	Bedienpanel	47
4.5	Softwarewerkzeuge	48
4.5.1	Steuerungssoftware	48
4.5.2	HMI - Software.....	48
4.5.3	Antriebssoftware.....	48
4.5.4	Programmiergerät	49
5	Entwurf des neuen Steuerungskonzeptes.....	50
5.1	Entwurf des Steuerungsprogrammes	50
5.1.1	Automatischer Ablauf.....	50
5.1.2	Zusatzfunktionen im Automatikbetrieb.....	53
5.1.3	Handbetrieb	55
5.1.4	Servicefunktionen	56
5.2	HMI Oberflächenerstellung	57
5.3	Reglerparametrierung	58

6 Erhebung des Optimierungspotentials.....	59
6.1 Taktzeitverkürzung.....	59
6.1.1 Parallele Abläufe	59
6.1.2 Positionierzeiten	62
6.2 Spiegeltemperatur und Anschlussleistung	63
6.2.1 Temperaturverlauf	63
6.2.2 Energieverbrauch	63
6.3 Prozessqualität.....	65
6.4 Verschleiß	66
6.5 Bedienkomfort.....	66
6.5.1 Hilfsfunktionen	67
6.5.2 Prozesswerteingabe.....	68
6.5.3 Optimierung der Navigationsmenüstruktur	71
6.5.4 Optimierung des Bildaufbaus.....	75
6.5.5 Bildsymbole.....	78
6.6 Umrüst-, Service- und Inbetriebnahmezeiten	80
7 Verifikation an der Maschine.....	82
7.1 Taktzeitmessung.....	82
7.1.1 Positionierzeiten	82
7.1.2 Zeitaufteilung.....	83
7.1.3 Folgerungen	84
7.2 Regleruntersuchungen	84
7.2.1 Servoantrieb des Shuttles	85
7.2.2 Servoantrieb des Spiegelvorschubes	86
7.2.3 Servoantrieb der Spiegelhubachse	86
7.2.4 Servoantrieb der Deckelachse	88
7.2.5 Folgerungen	88
7.3 Temperaturmessungen.....	89
7.3.1 Ermittlung der Zeitkonstanten.....	89
7.3.2 Temperaturverteilung.....	90
7.4 Leistungsmessungen.....	92
8 Zusammenfassung und Ausblick	93
Literaturverzeichnis.....	95
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis.....	99

Kapitel 1

Einleitung

Jahrelang sind Spiegelschweißmaschinen schon zuverlässig in der Batterieindustrie zum Verschließen der plattenbestückten Bleiakkumulatoren im Einsatz.

Ständige Verbesserungen in den vor- und nachgeschalteten Prozessen der Montagelinie haben es nun erfordert auch den Schweißprozess ins Visier zu rücken, da dieser ehemals nicht so zeitkritische Produktionsschritt mittlerweile an seine Grenzen gestoßen ist.

Aus diesem Grund wurde eine Optimierung dieses Prozesses angestrebt. Wie man richtig erkannte, konnte eine wesentliche Verbesserung dieses Produktionsschrittes nur durch grundlegende Änderungen im mechanischen Aufbau der Maschine erzielt werden, weshalb ein Prototyp einer Spiegelschweißmaschine entstanden ist.

Nun wird wohl der Entwurf eines lauffähigen Steuerungsprogrammes für diese Maschine als Basisaufgabe schon allein aufgrund der mechanischen Neuauslegung Verbesserungen gegenüber bestehenden Anlagen erreichen. Für den Automatisierungstechniker bietet sich hier aber die Gelegenheit, durch ebenso grundsätzliche Untersuchungen aller beteiligten Einzelabläufe und Eigenschaften die tatsächlichen Grenzen der Maschine auszuloten und dadurch vorhandene Möglichkeiten auszuschöpfen. Im Gegensatz dazu können dadurch aber ebenso Schwachstellen in der Konstruktion aufgezeigt werden.

Der besondere Reiz dieser Aufgabe liegt in der Anwendung unterschiedlichster Disziplinen. Neben der grundlegenden Automatisierungstechnik und Informationsverarbeitung ist die Anwendung von Grundlagen der Thermodynamik, Mechanik und Kunststofftechnik, sowie von praktischer Elektrotechnik und Pneumatik notwendig. Außerdem zeichnet dieses Projekt besondere Realitätsnähe aus, wird doch das Ergebnis all dieser Einzeldisziplinen in Form einer optimierten Maschine zur industriellen Serienproduktion eingesetzt.

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgaben zur Durchführung dieser Diplomarbeit lassen sich somit in zwei Abschnitte unterteilen. In der ersten Phase gilt es eine Inbetriebnahme der Maschine, wie sie in Bild 1.1 zu sehen ist, durchzuführen und unter Zusammenarbeit mit der elektrischen Schaltungsentwicklung ein Steuerungskonzept zu erstellen, sodass die Funktion und Zusammenarbeit aller Komponenten gewährleistet ist. Anschließend soll, basierend auf den Ergebnissen dieses

Versuchskonzeptes in einem zweiten Schritt das Optimierungspotential für Taktzeit, Prozessqualität, Energieverbrauch, Verschleiß und Ergonomie identifiziert werden. Nach dem Einbau sollen die umgesetzten Lösungen in produktionsnahem Betrieb verifiziert werden.



Bild 1.1: Spiegelschweißmaschine mit Bedieneinheit an der Schutzumhausung

1. Phase: Inbetriebnahme der vorhandenen Technik

Da der Aufbau der Maschine während der Entwicklung des Steuerungsprogrammes noch im Gange ist, fließen hier noch Erkenntnisse aus der Inbetriebnahmephase in die elektrische Steuerungstechnik ein, sodass die endgültige Verkabelung erst nach diesem Schritt festliegt. Folgende Punkte sind für die Diplomarbeit durchzuführen:

- Konfiguration der Antriebselektronik und Inbetriebnahme der vier Achsen
- Inbetriebnahme des Pneumatikteilens mit zugehöriger Ventilinsel
- Inbetriebnahme der Zentralschmierung
- Initialisierung und Inbetriebnahme des Bedienpanels mit Erstellung der Bedienungsgrundfunktionen
- Entwicklung und Implementierung eines Steuerungsprogrammes mit Einbindung aller Funktionen

2. Phase: Optimierung

Durch die moderne Hardware und die neue Mechanik besteht im Vergleich zu bisher eingesetzten Maschinen ein erhebliches Potential für Verbesserungen des gesamten Prozesses. Im Rahmen dieser Arbeit sind die neuen Möglichkeiten zu identifizieren und nach Einbau zu verifizieren:

- Ansätze zur Verkürzung der Taktzeit auf Ablaufe Ebene
- Verringerung der maximalen Anschlussleistung

- Untersuchung und Verbesserung der Spiegelheizung
- Überarbeitung der Bedienerführung und Erhöhung der Übersichtlichkeit
- Einbau von Hilfsfunktionen für Service und Betrieb

Die Überprüfung der gefundenen Lösungen findet durch eine Inbetriebnahme der gesamten Maschine im Werk des Kunden statt.

1.2 Rahmenbedingungen

Nachdem das Endprodukt als betriebsbereite Maschine in eine bestehende industrielle Umgebung eingepasst wird, sind auch einige Rahmenbedingungen einzuhalten. Durch Verwendung von Antriebshardware der neuesten Generation und Verwendung der zugehörigen Software besteht keine Wahlfreiheit für die einzusetzende Plattform. Dies ist schon dadurch begründet, dass das Service am Einsatzort durch die dort zur Verfügung stehenden Werkzeuge möglich sein muss. Vorgegeben sind damit:

- Sinamics-Antriebe und zugehörige Siemens-Parametriersoftware
- Bedienpanel und zugehörige Entwicklungssoftware von Siemens
- Simatic – Steuerung mit Technologiefunktion und damit STEP7 zur Programmerstellung
- Windows Betriebssystem für die Arbeitsumgebung

Der Leser wird bereits erahnen können, dass diese umfangreiche Aufgabenstellung in ein straff vorgegebenes Terminkorsett gezwängt ist. Der festgelegte Zeitplan ist bereits auf den Einbau der Spiegelschweißmaschine in die bestehende laufende Produktion abgestimmt.

1.3 Leitfaden

Damit dieses Ziel zu Erreichen ist, werden folgende Themen in dieser Arbeit behandelt:

Zu Beginn wird die zukünftige Umgebung der Maschine beschrieben, und kurz erläutert, wie solche Maschinen bisher aufgebaut waren.

Darauf aufbauend werden die Details des Heizelementschweißens erarbeitet, wo neben dem eigentlichen Erwärm- und Fügevorgang eine Analyse der Bewegungen selbst vorgenommen wird und Modelle zur Berechnung erarbeitet werden.

Das folgende Kapitel 4 untersucht die vorhandene Technik. Neben einem Blick auf das Heizelement und die zugehörige Temperaturregelung wird auf die verwendeten Servoantriebe näher eingegangen. Eine Untersuchung des Bedieninterfaces schließt diese Analysen an und führt in das Kapitel 5. Dort wird beschrieben, wie ein Steuerkonzept aussehen kann, um für eine praxistaugliche Maschine gerüstet zu sein. Die Themen betreffen die

SPS-Programmierung im Überblick, sowie das Benutzerinterface und die Parametrierung der Regler.

Das folgende Optimierungskapitel 6 versucht anhand der nun bereits lauffähigen Maschine Möglichkeiten zur Prozessoptimierung zu finden, Taktzeit, Temperatur- und Energieverbrauchsoptimierung, sowie Bedienkomfort gelten als Ziel.

In Kapitel 7 werden Untersuchungen an der fertigen Maschine ausgeführt. Die Messungen betreffen die Optimierung der Taktzeit, die Untersuchungen der Temperatureigenschaften und Messungen an den Servoreglern und dienen der Verifizierung der Ausführungen.

Den Abschluss bildet eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit.

Kapitel 2

Stand der Technik

Die ersten Versuche an Bleiakkumulatoren mit Elektrolyten aus Schwefelsäure wurden bereits vor 150 Jahren durchgeführt und ihre Serienproduktion erfolgt mittlerweile seit etwa 100 Jahren. Der Bedarf ist seitdem kontinuierlich gestiegen, eng gekoppelt an die Produktionssteigerung von Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Allein in den damals 25 Ländern der Europäischen Union im Jahr 2004 waren über 210 Mio. PKW zugelassen [Eur07], was bei einer Lebensdauer der Starterbatterien von etwa 5 Jahren einen beachtlichen Bedarf an Produktionskapazitäten bedeutet.

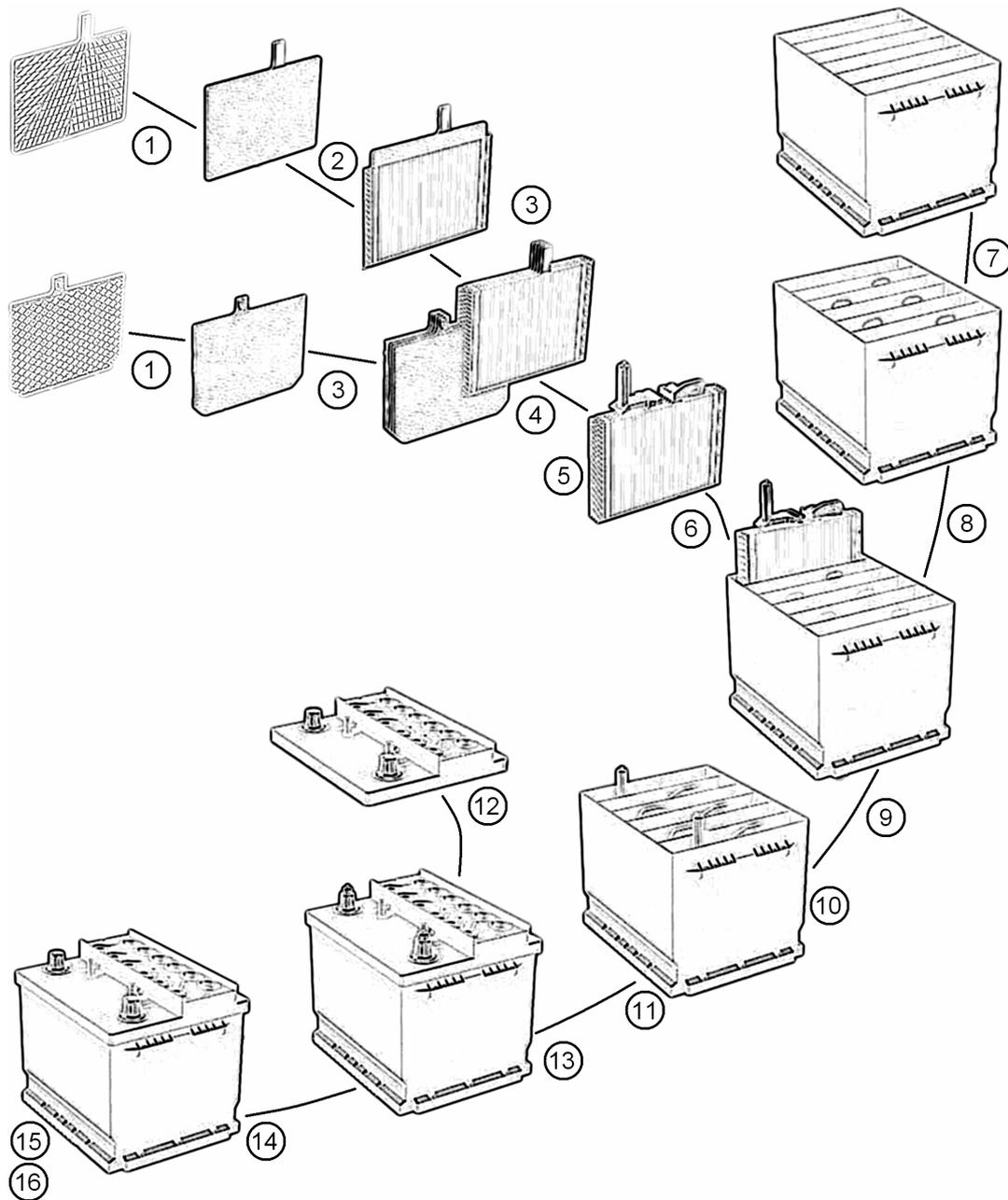
In diesem Kapitel soll dargestellt werden, wie die Produktion heutzutage erfolgt, welche Maschinen dazu erforderlich sind und wie diese anhand einer beispielhaften Maschine zum Verschweißen der Batteriedeckel im typischen Fall aufgebaut sind.

2.1 Industrielle Batterieproduktion

Die Serienproduktion von KFZ-Starterbatterien wird heutzutage in hohem Maße automatisiert durchgeführt. Wesentliche Gründe dafür sind Qualitätssteigerung und Taktzeitverkürzung, was wegen besserer Maschinenauslastung und Energie- und Rohstoffausnutzung meist auch in kostengünstigerer Produktion resultiert.

Automatisierung bedeutet außerdem in diesem Bereich den verbesserten Schutz des Bedienpersonals durch die auftretenden Gefahren. Dabei handelt es sich einerseits um Gefahren, die von den beteiligten Rohmaterialien ausgehen, wie den entstehenden Bleistaubverbindungen oder der Verwendung von Schwefelsäure als Elektrolyt [Bau97]. Andererseits gehen Gefährdungen vom Produktionsprozess selbst aus, hier seien Dämpfe von heißen Kunststoffen genannt, oder Verbrennungs- und Quetschgefahren die von den Produktionsmaschinen ausgehen, nicht zuletzt Schäden am Bewegungsapparat des Personals durch das schwere Produkt selbst.

Die zur Herstellung von Standard - Starterbatterien notwendigen Produktionsschritte bis zum Endprodukt werden hier kurz skizziert, um die Randbedingungen für den Einsatz einer Spiegelschweißmaschine im Detail zu erarbeiten (Bild 2.1).



- | | |
|--------------------------------|------------------------|
| 1-Pastieren der Gitterplatten | 9-Hochspannungsprüfung |
| 2-Eintaschen in Separatorfolie | 10-Verbinderschweißen |
| 3-Stapeln zu Zellelementen | 11-Hochstromprüfung |
| 4-Beladen | 12-Deckel auflegen |
| 5-Gießen der Anschlüsse (COS) | 13-Deckelschweißen |
| 6-Entladen und Einsetzen | 14-Polschweißen |
| 7-Lochstanzen | 15-Polhöhenmessung |
| 8-Beleimung | 16-Dichtheitsprüfung |

Bild 2.1: Montageprozess einer Starterbatterie

2.1.1 Vorarbeiten

Am Beginn der Montagelinie werden die Elektrodenplatten dem Produktionsprozess zugeführt. Das Bleigitter mit einer aufgetragenen aktiven Paste, die im Fall der positiven Elektroden aus dem roten bzw. gelben Bleioxid, und im Fall der negativen Platten aus grauem Bleischwamm besteht. Die Pasten wurden im vorhergehenden Prozessschritt, wie in (1) im Bild 2.1 dargestellt ist, durch den Curing-Vorgang¹⁾ und nachfolgende Lagerung fest mit dem Gitter verbunden und unter Vermeidung von Rissbildung getrocknet [Lin94, Cro00].

2.1.2 Montagelinie

Ein kurzer Überblick über die Batteriemontage kann folgendermaßen aussehen (Bild 2.1): Durch eine Eintaschmaschine werden die positiven Platten von einem Separator, einer Tasche aus einer elektrolytdurchlässigen Polyethylenfolie umhüllt (2), und danach abwechselnd mit negativen Platten zu Paketen gesammelt (3).

Plattengröße einerseits und Anzahl der Platten der Pakete andererseits ergeben später die aktive Plattenoberfläche und somit die Kapazität des Akkumulators. Alternative Separatoren sind gesintertes PVC, für hochwertigere Batterien wird Glasvlies verwendet [Bes99].

(4): Die Stapel werden nun durch einen Manipulator richtig orientiert zu Sätzen zusammengestellt und damit eine Kassette beladen, die in der nachfolgenden Anlage kopfüber in eine Form mit einer flüssigen Bleilegierung getaucht werden (5).

Dadurch verbinden sich die Anschlussfahnen der Einzelplatten zu den Zellelementen, und die Zellverbinder und Anschlusspolstifte werden ausgeformt.

An einem zweiten Startpunkt der Montagelinie werden die Batteriekästen als Zulieferteil in einem Stanzautomat mit Löchern in den Zwischenwänden versehen, wo später die Zellverbinder für eine Serienschaltung durchkontaktiert werden (7).

Die Kästen laufen nach der Lochstanze über eine Rollbahn durch den gesamten Prozess, der folgende Schritt ist zunächst ein Leimautomat, der am Boden jeder Zelle Kleber aufträgt (8). Ein Entlademanipulator holt die vergossenen Zellelemente aus der Kassette und setzt sie in den thermoplastischen Kleber der positionierten Batteriekästen (6). Durch diese Festsetzung wird die Rüttelfestigkeit der fertigen Batterie erhöht, die Plattenfahnen bzw. Zellverbinder sind vor Abriss besser geschützt.

Der anschließende Prüfautomat kann nun durch Prüfspitzen mit Hochspannung den korrekten Sitz des isolierenden Separators prüfen, und fehlerhafte Batterien aussortieren (9).

¹⁾ Der Curing-Vorgang, der dem Aufbringen der aktiven Paste auf die Gitter folgt, ist ein chemischer Prozess in 3 Schritten und läuft in einer Klimakammer ab: 1) Oxidation des Restbleis zu PbO, 2) Bildung einer stabilen Übergangsstruktur Gitter/Masse, 3) Trocknung der Platte [Cro00]

Die Zellverbinder der geprüften Batterien werden in der folgenden Maschine mit einer Schweißzange durch die Stanzlöcher der Zwischenwände elektrisch punktverschweißt (10), was wiederum ein nachgeschalteter Automat durch Hochstromprüfung auf erforderlichen Maximalwiderstand prüft und gegebenenfalls aussortiert (12).

An diesem Punkt kommt nun die Deckelschweißmaschine zur Anwendung, die das Hauptthema dieses Projektes ist. Als Methode wird das Heizelementschweißen eingesetzt.

Der Deckel als Zulieferteil wird dabei entweder vorher manuell auf den Batteriekasten gelegt, woher die Maschine ihn dann hochhebt, oder er wird seitlich aus einem automatischen Deckelmagazin in die Maschine befördert (12).

Die Deckelschweißmaschine verbindet den Deckel, in den Polhülsen eingegossen sind, durch eine druckbeständige Verbindungsnaht mit dem Batteriekasten (13).

Im folgenden Automaten werden die Anschlusspole verschweißt, meist erfolgt das unter Autogenflamme mit übergestülpter, gekühlter Polform. Die Batterie sollte nun, bis auf die Einfüllöffnungen dicht verschlossen sein.

Das wird durch die anschließenden Einrichtungen überprüft, eine erste zur Messung der korrekten Polhöhe zur Qualitätsprüfung des Polschweißautomaten, eine weitere zur Prüfung der Dichtheit der Batterie. Im Wesentlichen wird dabei über Gummistutzen Pressluft in die Batterie geblasen und der Druckabfall gemessen und bewertet.

Dies kann zugleich das Ende der Montagelinie sein, falls die Batterien nun auf Paletten oder Rollbahnen in den Bereich der Produktion gebracht werden, wo sie mit Säure befüllt und formiert werden, optional können aber noch Automaten zum Eindrehen der Verschlussstopfen und Anbringen von Etiketten bzw. einer Produktionsnummer stehen, falls die Batterien ungefüllt und ohne Formation das Werk verlassen sollen.

Die typischen Taktzeiten in der großindustriellen Batteriemontage hängen hauptsächlich vom zentral gelegenen Herstellprozess zur Verbindung der Anschlussfahnen der Plattensätze ab, sie liegen etwa zwischen 30 und 40 Sekunden, Versuche bis 20 Sekunden werden allerdings schon durchgeführt. Das ist damit auch die Vorgabe für alle vorhergehenden und nachfolgenden Maschinen, um die Taktzeit der gesamten Produktionslinie nicht zu bremsen.

2.1.3 Produktionsabschluss

Akkumulatoren direkt aus der Montage enthalten auf den positiven Platten vorwiegend Bleioxid (PbO). Nach Befüllen der Batterie mit verdünnter Schwefelsäure wird dieses während der erstmaligen Ladung, der Formation, in schwarzbraunes Bleidioxid (PbO₂) umgewandelt. Das entspricht dem vollgeladenen Zustand und somit dem Auslieferungszustand in einer von zwei Varianten. Bei entleertem Elektrolyten (uug – ungefüllt und geladen) ist der Akku wesentlich länger vor dem endgültigen Einsatz lagerfähig als in korrekt befüllten Zustand mit einer Säuredichte von 1,28 kg/l (gug – gefüllt und geladen) wo der Alterungsprozess ab diesem Zustand einsetzt [Lin94, Cro00].

2.2 Prozess Deckelschweißen

Aufgabe dieses Prozesses ist das Zusammenfügen des Batteriedeckels mit dem Batteriekasten, in den aus vorhergehenden Prozessen die Zellelemente eingesetzt und durch Punktschweißung miteinander in Serienschaltung elektrisch verbunden wurden.

Der heutzutage verwendete Kunststoff für die zu verbindenden Teile ist das schlagzähe und säurebeständige Polypropylen aus der Gruppe der Thermoplaste.

Für Thermoplaste stehen grundsätzlich mehrere Fügeverfahren zur Auswahl [Dvs99]:

- Mechanische Verbindungen
- Kleben
- Schweißen

Einige Anforderungen des Endproduktes lassen sich rein mechanisch, wie Schnappverbindungen oder Niet- bzw. Schraubverbindungen nur schwierig herstellen. Auslaufsicherheit des Elektrolyten kann wohl nur mittels zusätzlichen Dichtungen hergestellt werden. Klebeverbindungen sind für unpolare Kunststoffe wie Polypropylen im Allgemeinen ungeeignet.

Kunststoff - Schweißverbindungen erfordern bei Thermoplasten keine Zusatzstoffe, sie können zusätzlich die Höhentoleranzen der Ausgangswerkstücke ausgleichen. Für die Produktion bei großen Stückzahlen ist Schweißen damit eine gut geeignete Technik.

Es sind eine Reihe von Techniken zum Schweißen von Kunststoffen entwickelt worden (Bild 2.2).

Der Schweißvorgang kann ausgeführt werden:

- durch feste Körper, wie aufgeheizte Metallteile
- durch Gase, beispielsweise Heißluft
- durch Bewegung, wodurch sich das Material selbst erhitzt
- durch elektrische und magnetische Felder, unter Ausnutzung der Materialverluste
- durch Strahlung, die vom Material absorbiert wird

Heizelementschweißen mit Kontakterwärmung ist das älteste mechanisierte Verfahren zum Schweißen von Kunststoffen. Anwendung findet in geringerem Maße Reibschweißen als neuere Technik [Dvs99].

Heizelementschweißen, hier auch als Spiegelschweißverfahren bezeichnet, basiert auf der direkten Erwärmung der Fügeflächen durch eine beheizte Platte wobei an den Fügeflächen gezielt eine Schmelzschicht aufgebaut wird. Nach Entfernung dieses „Spiegels“ werden die Kunststoffteile unter Druck zusammengefügt und danach ausgekühlt. Details zu dieser Technik werden im Kapitel 3 diskutiert.

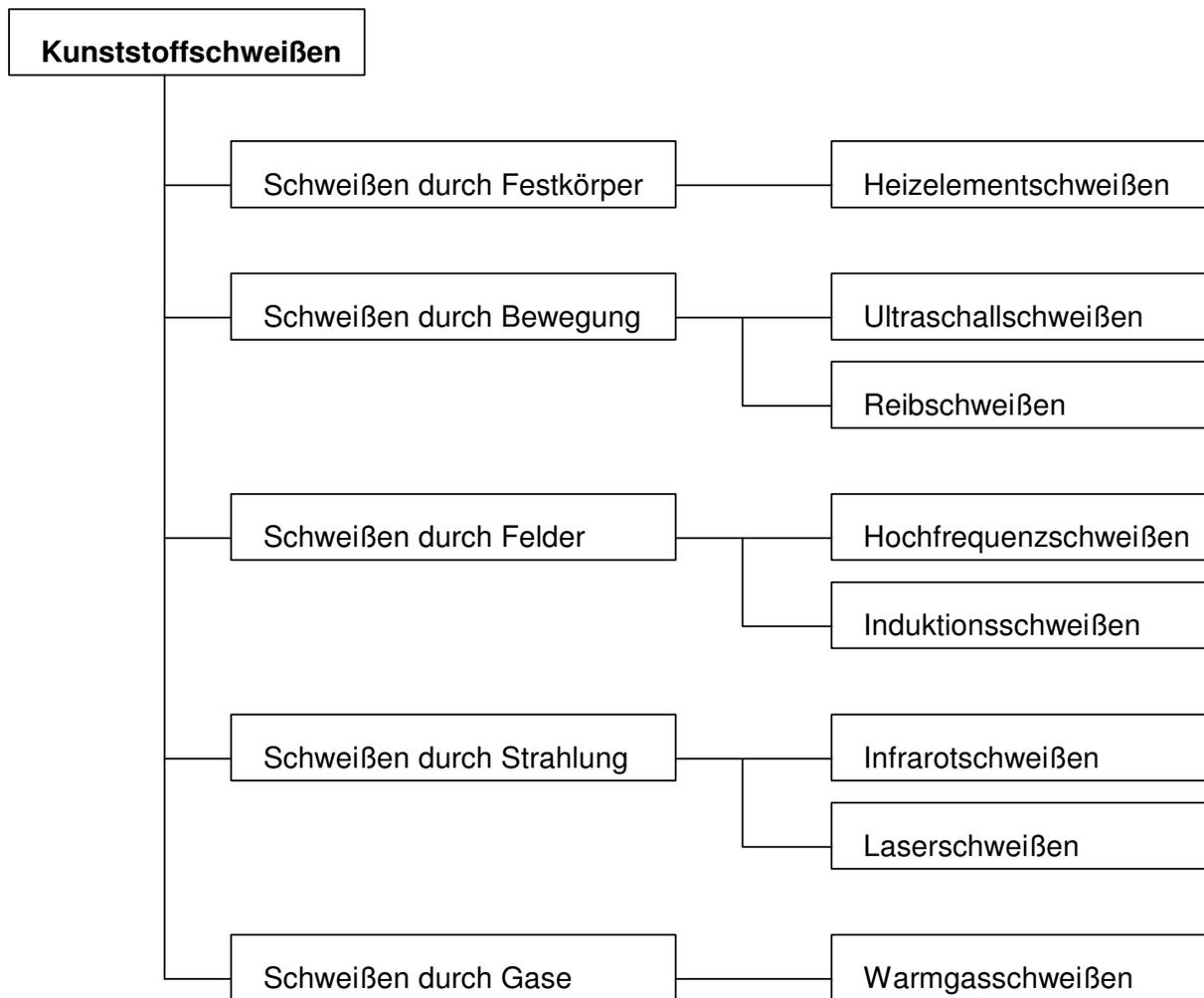


Bild 2.2: Methoden zum Schweißen von Kunststoffen

2.3 Mechanik und Antrieb

Maschinen mit automatisiertem Prozessablauf für die Batterieherstellung werden seit den frühen 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts gebaut, und haben sich bis heute einen Spitzenplatz in der Großserienfertigung erhalten. Die Mechanik einer Spiegelschweißmaschine besteht im Wesentlichen aus 3 Gruppen (Bild 2.3):

- Batteriekastenzuführung
- Spiegelpositionierung
- Deckelzuführung

Natürlich ist es notwendig, dass diese Funktionsgruppen durch eine Rahmenkonstruktion stabil miteinander verbunden und zusätzlich am Boden fixiert werden, um die teils enormen Beschleunigungskräfte aufnehmen zu können und so präzise Positionierungen zu erzielen.

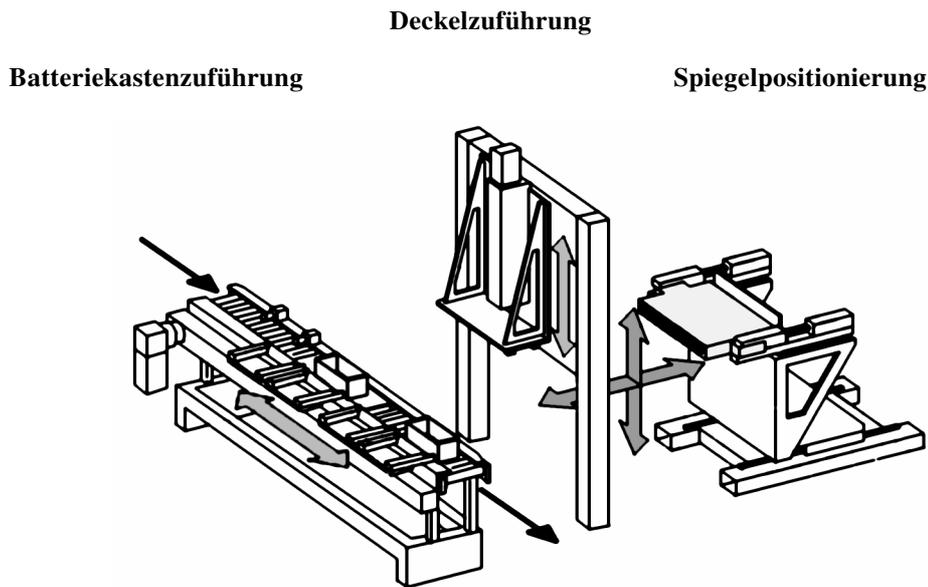


Bild 2.3: Hauptfunktionen einer Spiegelschweißmaschine

2.3.1 Batteriekastenzuführung

Die Batteriekastenzuführung ist im einfachsten Fall eine Rollbahn, wie sie für den gesamten Montageablauf der Batterien ohnehin Verwendung findet. Die einzelnen Batteriekästen laufen dabei über angetriebene Rollen in undefinierten zeitlichen Abständen in die einzelnen Maschinen, in diesem Fall zum Verschweißen des Deckels.

Der Rollenantrieb kann dabei direkt, oder über Friktionskupplungen zwecks Verschleißminderung von Rollen und Schonung des Werkstücks erfolgen. Die Transportgeschwindigkeit ist entweder über Getriebemotoren festgelegt, oder umrichter gesteuert stufenlos einstellbar. Aus dieser Geschwindigkeit ergibt sich ein maximaler Zufuhrtakt der Batterien, der aktuelle Takt wird allerdings von der maximalen Taktzeit der vorhergehenden Prozesse bestimmt.

Aufgrund der undefinierten zeitlichen Abstände der Werkstücke müssen einerseits Einlauftakt und Schweißmaschine synchronisiert werden, andererseits muss verhindert werden, dass mehr als die vorgesehene Batterieanzahl in die Maschine gefördert wird. Es sind Maschinen in Verwendung, die ein, zwei oder drei Batterien gleichzeitig schweißen können.

Die genannten Aufgaben werden üblicherweise durch pneumatische Stopper in Verbindung mit Lichtschranken bewerkstelligt.

Das besonders bei Mehrfachmaschinen auftretende Problem des langsamen Ein- und Auslaufens der Batteriekästen wird in neuerer Zeit durch einen von der Rollbahngeschwindigkeit unabhängigen Transportmechanismus, den „Shuttle“, gelöst, der eine Gruppe von vorkonfigurierten Batterien in einem Zug mit erhöhter Geschwindigkeit in die korrekte Bearbeitungsposition in der Maschine schiebt, und gleichzeitig die fertig verschweißten Batterien

auf ein Auslaufband für die nachfolgenden Prozesse befördert, wo sie wieder mit normaler Bandgeschwindigkeit weitertransportiert werden.

2.3.2 Spiegelpositionierung

Zum Anschmelzen von Batteriekasten und Deckel und nachfolgendem Zusammenpressen ist eine Horizontalbewegung des Heizspiegels notwendig um in Arbeitsposition und Wartestellung zu gelangen, eine Vertikalbewegung der Deckelhaltevorrichtung um den Deckel auf den Spiegel bzw. den Kasten abzusenken, und schließlich eine vertikale Relativbewegung zur Annäherung des Spiegels zum Kasten. Letztere wird durch zwei unterschiedliche Lösungen erreicht: Zum einen kann eine Hubtisch-Konstruktion den Batteriekasten gegen den ausgefahrenen Spiegel drücken, zum anderen kann das gleiche erreicht werden, wenn der Spiegel zweiachsig bewegbar ausgeführt ist und die Batterie in Position bleiben kann.

Da die Technik des Spiegelschweißens schon langjährig angewendet wird, waren solche Maschinen bisher mit mechanischen, pneumatischen, meist aber hydraulischen Antrieben ausgestattet. Letztere erlauben hohe Stellkräfte und -geschwindigkeiten, haben aber auch signifikante Einschränkungen.

Im Vergleich dazu zeigen elektrische Servoantriebe als modernere Variante überwiegend Vorteile.

Vorteile von Servoantrieben

In Verbindung mit präzisen Führungen und Spindel- oder Riemenantrieben sind bei Einsatz von Servomotoren schnelle Bewegungen auf exakte Positionen und feine Kraftregelungen möglich. Da keine Umsetzung auf ein weiteres Arbeitsmedium notwendig ist, können hochdynamische Regelungen realisiert werden, ohne auf veränderte Eigenschaften wie Temperaturabhängigkeit oder Alterung eines solchen Mediums reagieren zu müssen.

Als Vorteil für die Umwelt ergibt sich der Entfall von Ölverlusten durch Leckagen, im Vergleich zu Pneumatikantrieben entfällt zudem die Lärmbelastung durch das Entlüften der Achszylinder.

Nicht zuletzt gibt es auch wirtschaftliche Vorteile im Betrieb durch verminderte Servicearbeiten wegen Verschleiß und Entfall zur Aufbereitung des Trägermediums. In der Konstruktion sind zudem Anschaffungskosten und technische Auslegung eines Servoantriebes gut kalkulierbar.

Aufgrund der technischen Vorteile werden mehr und mehr Maschinen alter Bauart auf Servoantriebe umgerüstet, die ein einfacheres und präziser beherrschbares Verhalten der meist robust ausgeführten und damit immer noch wertvollen Mechanik zeigen.

Neue Maschinen mit Positionieraufgaben werden ohnehin vorwiegend mit dieser aktuellen Technik ausgestattet.

Für einfache Positionier- und Bewegungsaufgaben wie Stopper oder Klammern sind Servoantriebe zu aufwendig, hier sind Pneumatikzylinder die günstigste Wahl, Positionen können allerdings nur durch direkte mechanische Justierung verändert werden.

Zum Ausbauen des Heizelementes für Reinigung, Satzwechsel oder Reparatur kann dessen Halterung oft in eine vertikale Servicestellung gebracht werden. Diese Positionieraufgabe erfolgt in einfachen Fällen rein manuell, oder wie in diesem Projekt aufgrund der hohen Masse automatisch mit Pneumatikzylindern, da hier nur feste Endlagen angefahren werden müssen.

2.3.3 Deckelzuführung

Die Deckelzuführung besteht aus einer Halteklammer für den Deckel auf einem absenkbaaren Schlitten. Sie hat neben der kontrollierten Deckelpositionierung für Anwärm- und Fügevorgang die Aufgabe der automatischen Aufnahme des Batteriedeckels.

Der Aufnahmevorgang kann von zwei Positionen erfolgen. Für kleinere Serien wird der Deckel vor Einlauf in die Maschine manuell auf den Batteriekasten gesetzt und in einem Greifvorgang von dort durch die Maschine abgeholt.

Speziell für große Serien kann als vollautomatisierte Lösung eine externe Deckeinlegevorrichtung mithilfe eines Auslegers den Deckel aus einem automatischen Magazin in die Maschine unterhalb der Deckelklammer positionieren, wo sie von der Deckelzuführung übernommen werden kann.

2.4 Steuerung und Bedienung

Der deutlichste technische Fortschritt ist im Bereich der Steuerung und Bedienung von Industriemaschinen zu erkennen. Die grundlegenden Prinzipien, wie bei Mechanik und Antriebstechnik der Maschinen sind im Wesentlichen seit Jahrzehnten ähnlich geblieben, da nach wie vor Leistungsschalter und Stellglieder zur Bedienung der Aktoren notwendig sind. Dementsprechend haben sich die notwendigen Steuerschränke, allein aufgrund der gleich gebliebenen umzusetzenden Leistung aller Stellglieder kaum in ihren Abmessungen verringert. Was sich aber deutlich verändert hat ist die Vielfalt der Möglichkeiten zur Parametrierung, Überwachung und Visualisierung der Prozesse.

2.4.1 Buskommunikation

Als Standard sind Feldbusverbindungen zwischen den Baugruppen sowohl innerhalb der Steuerschränke zur Vereinfachung der Verkabelung, wie auch zwischen abgesetzten Einheiten anzusehen. Varianten wie Profibus, ASi oder CAN erlauben die flexible Anpassung von Bedieneinheiten oder Ventilinseln für Pneumatikzylinder an die örtlichen Gegebenheiten.

Das erleichtert die Inbetriebnahme nach der Montage ebenso wie nachträgliche Änderungen am Aufstellungsort aufgrund von Anpassungen des Produktionsprozesses.

Ebenso vereinfacht wird die Diagnose der gesamten Anlage im Fehlerfall, da meist an einem Punkt der Zugriff auf alle Sensor- und Aktordaten der ganzen Maschine möglich ist.

Durch Auslagerung von Steuerungsintelligenz an periphere Gruppen kommt es mehr und mehr zum Auseinanderdriften zwischen logischen und räumlichen Grenzen der einzelnen hierarchischen Ebenen der Automatisierungstechnik [Fav04]. Als Beispiel seien Servomotoren mit eingebauter Elektronik genannt. Gleichzeitig bietet sich genau dadurch die Möglichkeit, flexibel ausgewählte Daten an übergeordnete Ebenen weiterzureichen [Zei00]. So beginnt bereits innerhalb von Montagelinien der langsame Einzug von Industrial Ethernet statt Feldbussen. Das ermöglicht einen einfacheren Zugriff auf eine umfangreichere Vielfalt an Daten in kürzerer Zeit.

2.4.2 Benutzerschnittstellen

Die Bedienung der Maschinen erfolgt in zunehmendem Maße über grafikfähige Bedieneinheiten mit Touch - Panels oder Maus- bzw. Trackballbedienung statt Folientastaturen mit Textdisplays. Dadurch ist es möglich ein mehr an Information dem Bediener übersichtlicher zu präsentieren. Komplexere Vorgänge sind so mit überschaubarem Aufwand steuerungstechnisch machbar.

Die erweiterten Visualisierungsmöglichkeiten dieser Mensch – Maschine – Schnittstellen bieten zudem die Möglichkeit für einfachere und schnellere Diagnosen im Störfall.

Mechanische Taster und Schalter finden trotzdem noch Verwendung für oft betätigte Grundfunktionen, allein schon wegen der robusteren und manchmal präziseren Bedienung.

Was vor wenigen Jahren nur mit kostenintensiver spezialisierter Hardware machbar war, ist heute mit Standard – PCs möglich, man denke an Parametrierung von Baugruppen sowie Präsentation der relevanten Messergebnisse und Daten aus der Produktion außerhalb der Werkshalle.

2.4.3 Software

Im gleichen Maß wie die verbesserte Anzeige- und Kommunikationstechnik hat sich der Umfang der eingesetzten Software verändert. Als direkte Auswirkung der Miniaturisierung haben sich die Rechenleistung und Speichergrößen der zentralen Steuerungen und der Bedienerschnittstellen erhöht. Das damit aufwendiger gestaltbare Steuerungsprogramm kann verstärkt Protokollierung für Fehler und Produktionsdaten bieten. Bedienpanels laufen zunehmend unter leistungsfähigeren Standardbetriebssystemen wie Windows CE oder angepassten Linux – Varianten mit entsprechenden graphischen Möglichkeiten statt alphanumerischen Zeilenausgaben.

Deutlichen Zuwachs an Funktionalität und Größe hat Programmier- und Parametriersoftware erhalten, was den Aufwand für Servicewerkzeuge ebenso steigert.

Es ist somit leicht nachvollziehbar, dass Unternehmen zunehmend Wert legen auf vorherige Festlegung der angewendeten Softwarepakete auf unternehmenseigene Standards. Zusätzlich wandert mehr und mehr Funktionalität und Komplexität in Parametrierung der Baugruppen und Visualisierung, so dass diese Tätigkeiten neben der Programmierung der Logiksteuerung einen immer größeren Anteil an der zu entwickelnden Betriebssoftware darstellen. Dementsprechend aufwendiger sind damit die notwendigen Schulungsmaßnahmen für Service- und Instandsetzungspersonal.

2.4.4 Sicherheitstechnik

Eine nicht unwesentliche Bedeutung haben die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen. Industriemaschinen müssen mit Einrichtungen versehen sein, die das Bedienpersonals vor gefährlichen Bewegungen schützen. Deshalb ist der Bedienerplatz üblicherweise durch eine Schutzhäuserung von der eigentlichen Maschine getrennt. Bei Zutritt in den Gefahrenbereich müssen die Anlagen mit einer automatischen „Not – Halt“ Funktion ausgerüstet sein, die solche gefährdenden Bewegungen der Maschine unterbindet.

Bei Auftreten einer allgemeinen Gefahrensituation muss eine Maschine zusätzlich durch eine bedienbare „Not – Aus“ Funktion zuverlässig von der Energieversorgung getrennt werden können und darf sich nicht selbsttätig wieder einschalten können. Diese grundlegenden Sicherheitsvorschriften sind durch die einschlägigen Richtlinien festgelegt [MRL98, MRL06, NRL73, NRL06] und durch entsprechende Gesetze in den Ländern der EU verordnet.

Kapitel 3

Prozessbedingungen für das Steuerungskonzept

Die Technik des Heizelementschweißens erfordert den grundlegenden Vorgang des Erwärmens von Kunststoffmaterial bis über die Schmelzgrenze, sodass die Oberflächen der einzelnen Werkstücke nach Kontaktieren zu einer Einheit verschmelzen können.

Dieses Kapitel bietet einen detaillierten Blick in den Schweißvorgang selbst, analysiert aber auch gleichzeitig die für eine Automatisierung notwendige Bewegung von Produkt und Werkzeug, die unter Verwendung von Servoantrieben ausgeführt wird.

Im Anschluss daran werden die wesentlichen Qualitätskriterien erarbeitet, die eine Aussage über die korrekte und zuverlässige Verbindung der Werkstücke ermöglichen.

3.1 Grundlagen für das Heizelementschweißen

Die Verfahrenstechnik für das Heizelementschweißen ist ein Mehrstufenverfahren, da Erwärmungs- und Fügevorgang getrennt voneinander erfolgen.

Man kann drei Hauptphasen unterscheiden (Bild 3.1):

- Anwärmphase
- Umstellphase
- Fügephase

In der ersten Phase werden die in der Maschine positionierten und fixierten Füge­teile zunächst angeglichen. Der Angleichvorgang hat den Zweck, dass die Teile einen vollständigen Kontakt mit dem Heizelement erhalten und eventuelle Verschmutzungen aus der Fügeebene gedrückt werden. Hieran anschließend wird bei stark reduzierter Vorschubkraft das oberflächlich abgeschmolzene Material in die Tiefe erwärmt, um eine ausreichend dicke Schmelzschicht für das spätere Fügen zu erhalten. Durch Auswahl der Erwärmungszeit und der Grenzflächentemperatur lässt sich das Temperaturprofil der Schmelzschicht beeinflussen.

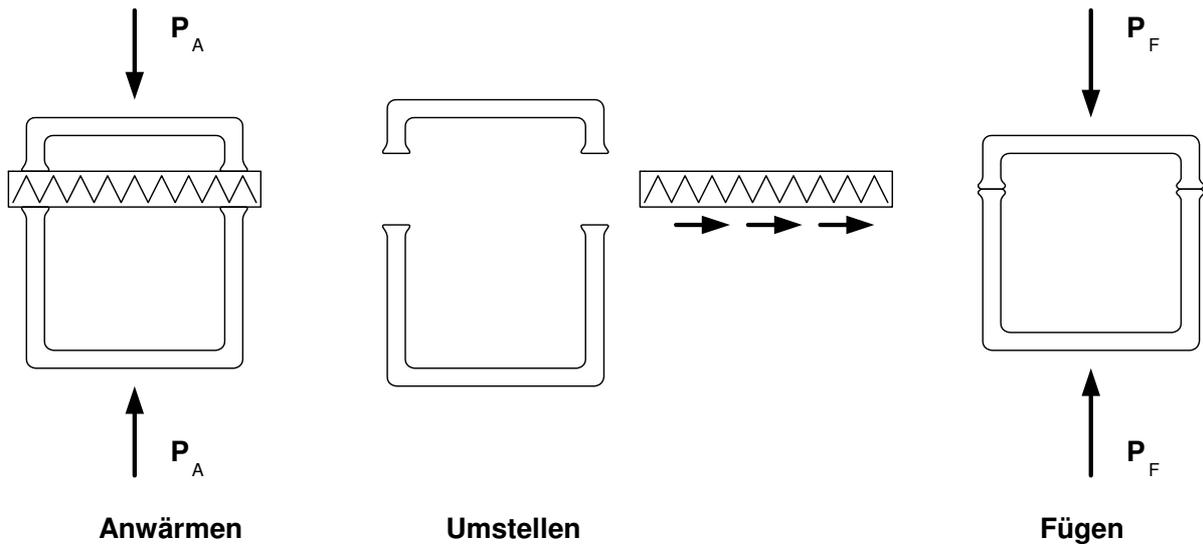


Bild 3.1: Darstellung der Phasen beim Heizelementschweißen

Als zweite Phase folgt die Umstellphase mit dem Ziel, in möglichst kurzer Zeit die Heizplatte von den Fügepartnern zu entfernen und diese zueinander zu positionieren ohne einen zu starken Temperaturabfall an der Schmelzoberfläche zu erleiden. Die Bildung einer erkalteten Haut an der Werkstoffoberfläche würde in der nachfolgenden Phase die Güte der Schweißnaht beeinträchtigen.

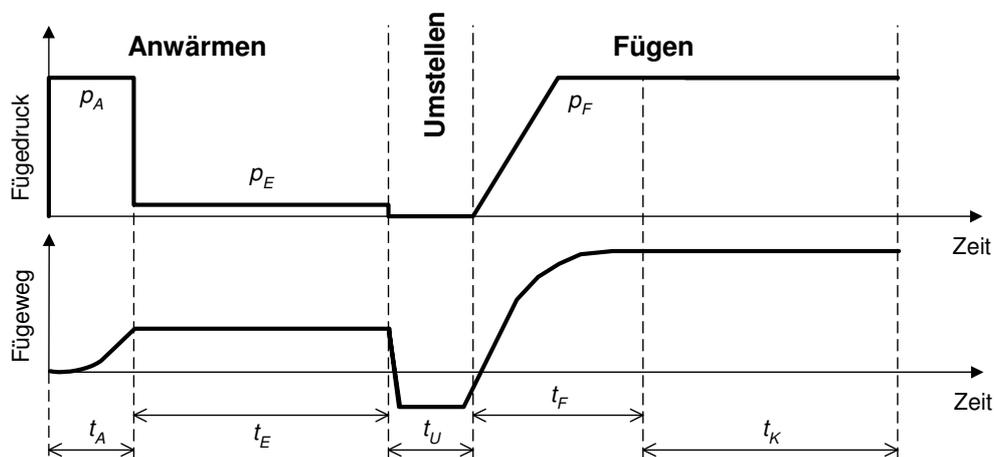


Bild 3.2: Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen mit Kraftvorgabe
Prinzipieller Kraftverlauf und abhängiger Wegverlauf

Die dritte Phase beginnt mit der Berührung der beiden Kunststoffteile und zeichnet sich durch ein ausgeprägtes Quetschfließen des Schmelzmaterials in den sich vergrößernden Wulst aus. Diese für die Festigkeit der Fügeverbindung entscheidende Phase hängt stark von der Wahl der optimalen Schweißparameter ab, die im wesentlichen Fügeweg und Fügedruck sind. Nach Unterschreiten der Aufschmelztemperatur ist bis zum vollständigen Er-

starran der gesamten Schweißnaht eine Auskühlphase erforderlich in der die Teile nicht zueinander bewegt werden dürfen um Rissbildungen zu vermeiden. Einen zeitlichen Verlauf des gesamten Zyklus für die Position der Heizplatte und für den Druckverlauf in der Fügezone als Ergebnis der Vorschubkraft des Heizelementes zeigt Bild 3.2

3.1.1 Anwärmphase

Diese erste Phase wird in die Teilschritte Angleichen und druckloses Erwärmen unterteilt. Je nach verwendeter Antriebstechnik kann dieser Vorgang durch Wegvorgabe oder Kraftvorgabe erfolgen. Moderne Servoantriebe verfügen über Momenten- bzw. Gradientenüberwachung und können so kombinierte Bewegungsverläufe erzeugen.

Angleichen

Nach dem Positionieren des beheizten Spiegels beginnt das Abschmelzen der Fügeteile durch eine Vorschubbewegung relativ zum Spiegel.

Bei Vorgabe eines Angleichdruckes p_A für eine definierte Angleichzeit t_A beginnt mit dem Druckaufbau eine instationäre Teilphase des zeitlichen Verlaufes des Abschmelzweges. Diese ist hervorgerufen durch die Materialaufheizung bis zur Aufschmelztemperatur, Materialdehnung, eine Wärmeentnahme aus der Heizelementoberfläche und nicht zuletzt durch das Erreichen eines vollflächigen Kontaktes zur Oberfläche des Heizelementes (Bild 3.3).

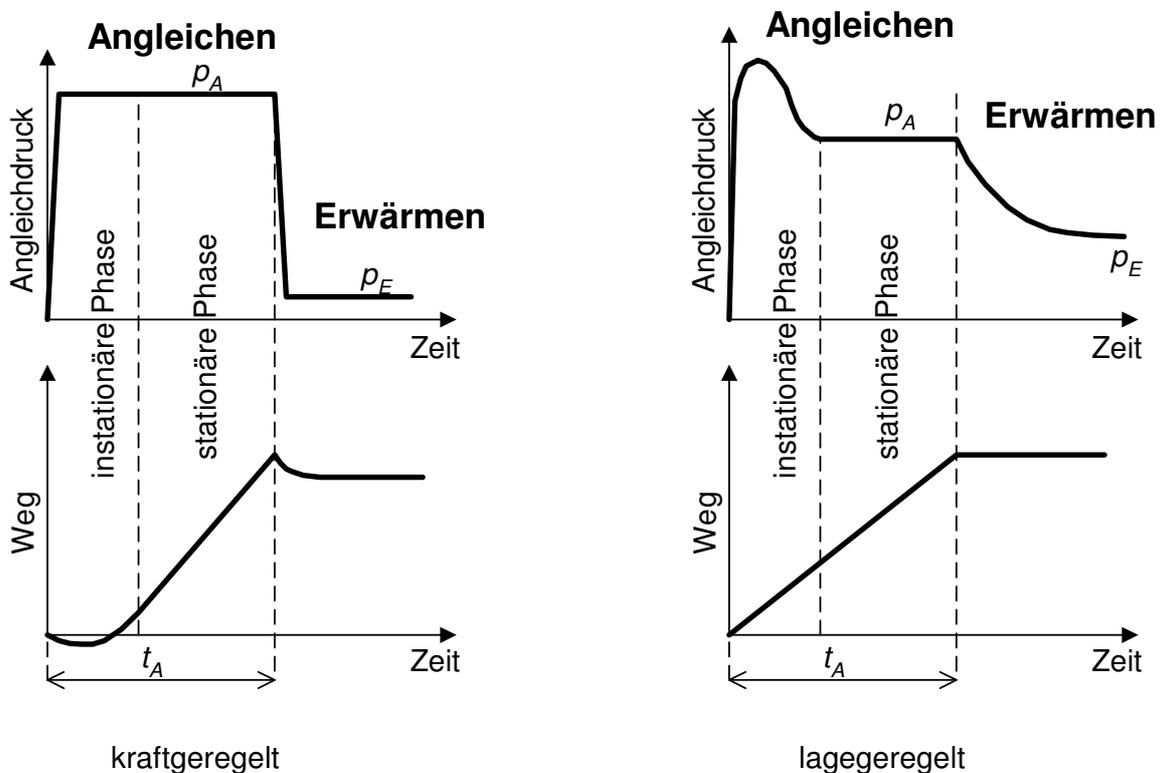


Bild 3.3: Druck- und Wegverlauf für die Angleichphase mit Kraftvorgabe und Weg/Geschwindigkeitsvorgabe als Strategien

In der darauf folgenden stationären Teilphase wird genauso viel Material in den sich ausbildenden Wulst verdrängt wie aufgeschmolzen wird, der Schmelzweg nimmt linear zu. Bei Erreichen der stationären Phase kann der Angleichvorgang abgebrochen werden, weil nun ein gleichmäßiges Aufschmelzen im darauf folgenden Teilschritt zu erwarten ist. Das Abbruchkriterium wird im maschinentechnisch einfachsten Fall durch Erreichen der vorgegebenen Abschmelztiefe erfüllt.

Eine alternative Methode zur Druckvorgabe ist die Vorgabe eines linear zunehmenden Angleichweges. Damit ergibt sich im Gegensatz zur ersten Methode erst nach kurzer Zeit ein stationärer Angleichdruck.

Für beide Methoden gilt jedenfalls, die Angleichzeit für eine Taktzeitoptimierung so kurz wie möglich zu halten.

Erwärmen

Am Ende der Angleichphase wird der Angleichvorschub abgeschaltet bzw. im Falle der Kraftvorgabe auf niedrigen konstanten Durchwärmdruck p_E umgeschaltet, der Weg der Grenzfläche nimmt während der Durchwärmphase nur mehr mit geringer Steigung zu. Durch Verweilen für die Erwärmzeit t_E in diesem Zustand soll eine für den Schmelzfluss genügend große Schmelzschichtdicke erreicht werden, die für eine gute Schweißnahtqualität notwendig ist (Bild 3.2). Das Temperaturprofil der Fügezone ist abhängig von der Heizelementtemperatur, der Erwärmzeit sowie von der Temperaturleitfähigkeit des Kunststoffes.

Die Temperaturleitfähigkeit für Kunststoffe ist im Allgemeinen gering, sie ist im Wesentlichen eine Funktion des Materials und der Fügeteilgeometrie, in geringem Maß aber ebenso von den Verfahrensparametern.

[Dvs2215] nennt bei Polypropylen als Richtwert für die gesamte Anwärmphase einen Wert von $t_A + t_E = 6s$, für den Angleichdruck werden $p_A = 0,1 \text{ N/mm}^2$ und zum drucklosen Erwärmen den Wert $p_E < 0,01 \text{ N/mm}^2$ empfohlen [Dvs2207].

3.1.2 Umstellphase

Als Umstellphase wird die Zeit vom Ende der Erwärmung bis zum Kontakt der Fügeflächen bezeichnet. In dieser Zeit werden die Flächen voneinander entfernt, und das Heizelement herausgefahren, womit ab diesem Zeitpunkt ein stetiger Temperaturabfall auftritt

Dieser Temperaturabfall der Fügeflächen ist abhängig von Umstellzeit, von der Grenzflächentemperatur zwischen Heizelement und Material, von Materialeigenschaften, Schmelzschichtdicke und klimatischen Umgebungsbedingungen. Das Ziel ist somit, die Umstellzeit zu minimieren, um die Schweißqualität nicht zu beeinträchtigen. Die Nahtqualität fällt nämlich genau dann extrem ab, wenn die Oberflächentemperatur die Kristallitschmelztemperatur unterschritten hat. Diese Schmelztemperatur liegt bei Polypropylen bei etwa 160°C . Für einen oberen Grenzwert der Umstellzeit werden etwa 5s als Praxiswert angegeben um die Nahtqualität noch nicht merklich zu verschlechtern [Dvs2215].

Somit erfordert der Umstellzyklus eine hohe Dynamik des Antriebs bei gleichzeitig genauer Positionierung vor dem Fügen, damit der Abstand der Fügepartner schnell und exakt zueinander geschlossen wird. Gleichzeitig soll dabei verhindert werden, einen Aufschlag mit hoher kinetischer Energie zu erhalten, oder vor dem Kraftaufbau zum Fügen einen großen Spalt überbrücken zu müssen.

3.1.3 Fügephase

Mit dem Berühren der Fügeflächen ist das Ende der Umstellphase erreicht. Auch die nächste Phase lässt sich in zwei Teilabschnitte unterteilen, die eigentliche Fügephase, die den Kern des Schweißprozesses darstellt und die darauf folgende Abkühlzeit bis zum Auswurf des fertigen Werkstückes.

Schon ab dem Ende der Erwärmzeit beginnt das aufgeschmolzene Material abzukühlen und kann nach Unterschreiten der Aufschmelztemperatur eine erkaltete Haut auf der Stirnfläche des Wulstes bilden. Da Polyolefine im Hochtemperaturbereich oberhalb von 260°C verschweißt werden damit eine ausreichende Fließfähigkeit für kurze Zykluszeiten erreicht wird, beginnt sich der Fügepartikelwerkstoff oberflächlich bereits zu zersetzen, wenn er mit dem Heizelement in Kontakt steht. Das kann neben der bereits entstandenen Haut auch Verbrennungsrückstände auf der Oberfläche bedeuten. Die Schmelzschicht soll nun noch so dick sein, dass die Haut durch den Vorschub aufgerissen werden kann, und eventuelle Rückstände durch den nachfolgenden Schmelzfluss aus der Fügezone gedrängt werden (Bild 3.4).

verdeckter Stumpfstoß:

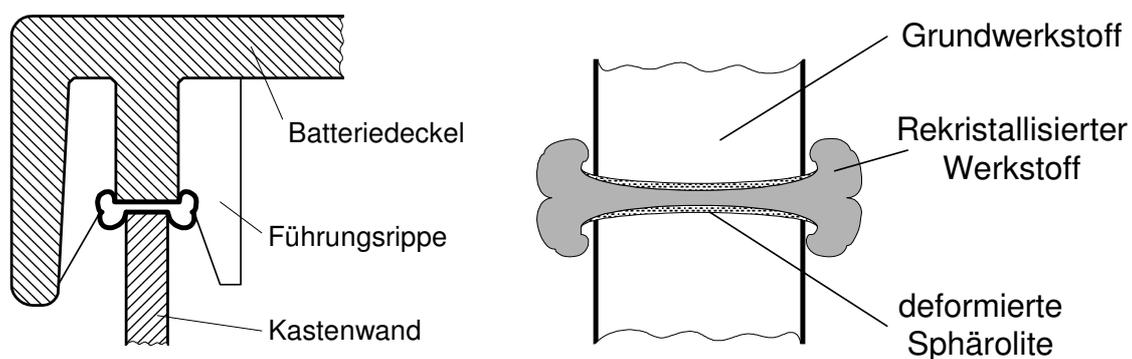


Bild 3.4: Schnittbilder – Geometrie der Fügenaht und Prinzip des Nahtaufbaus

Der Fügevorgang kann unter Vorgabe des Fügedruckes durchgeführt werden, wobei auf eine flache Druckanstiegsrampe zu achten ist. Damit soll erreicht werden, dass nicht in der weichen Anfangsphase zuviel des Materials in den Wulst gedrückt wird, das die eigentlich günstigsten Verbindungseigenschaften aufweist, und somit beide Fügepartner mit den Bereichen der nicht vollständig aufgeschmolzenen Zonen unter Bildung einer mangelhaften

Schweißverbindung in Kontakt treten. Die Methode der Druckvorgabe lässt sich speziell für hydraulische Antriebe einfach lösen.

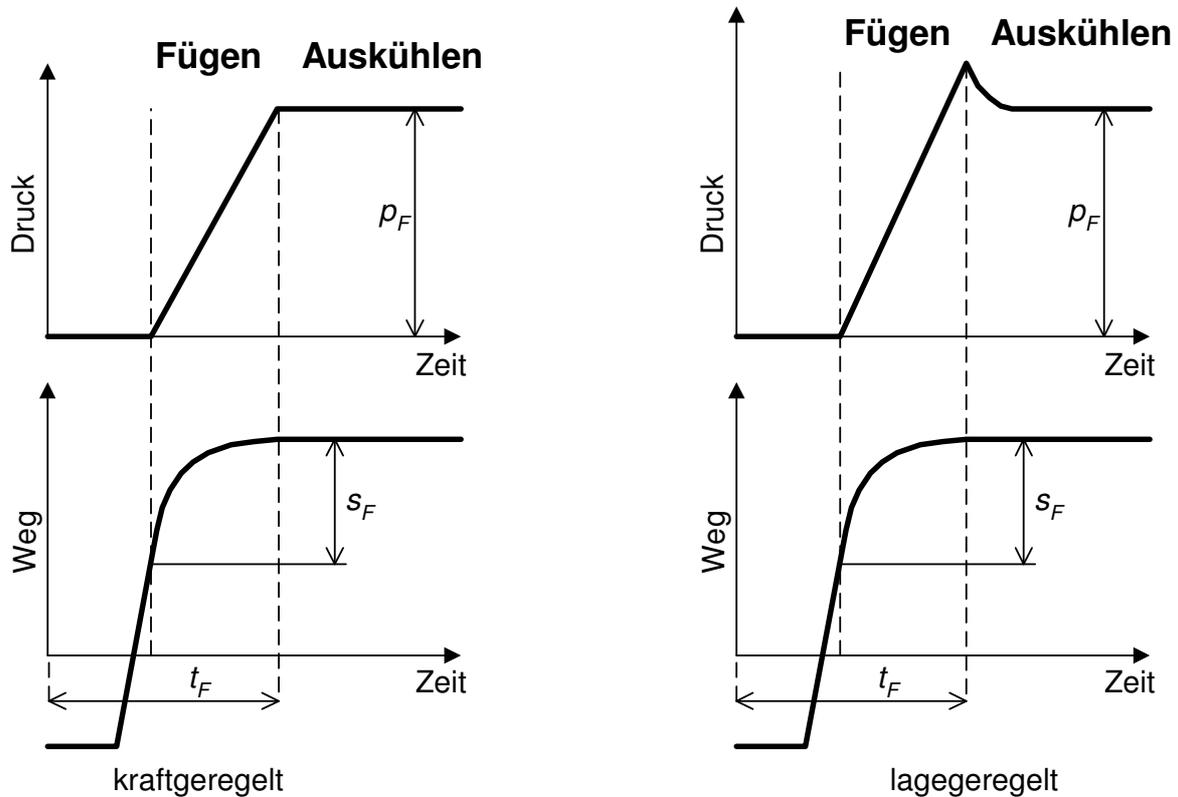


Bild 3.5: Druck- und Wegverlauf für die Fügephase bei Kraftvorgabe bzw. Positionsvorgabe

Alternativ zur Druckvorgabe kann man auch durch Vorgabe der Position eine gute Schweißnaht erzeugen. Bei genauerer Untersuchung ist aber zu erkennen (Bild 3.5), dass nach Erreichen der Endposition nach Ablauf der Fügezeit der durch den Vorschub anfangs aufgebrachte Druck abfällt. Dieser Effekt entsteht durch die nachlassende Wärmedehnung beim Erkalten des Materials in der Fügezone. Ein Unterschreiten eines kritischen Fügedruckes während der Materialerstarrung sollte vermieden werden, da sich durch die Materialschwindung innerhalb der Fügezone Risse bilden können, die die Festigkeit der gesamten Naht beeinträchtigen. Auch hier ist eine Mindestrestschmelzmenge noch vor Erreichen der Endlage erforderlich, was aber durch Wegvorgabe prinzipbedingt leicht erreichbar ist. Maschinentechnisch ist diese Aufgabe einfacher mit Servoantrieben umsetzbar. Für eine Positionsvorgabe wie in Bild 3.5 dargestellt ist eine Zielfahrt auf die Endposition mit konstanter Geschwindigkeit und mit starker Begrenzung der Bremsbeschleunigung durch den Antrieb eine Lösung, was für moderne Antriebe durchaus einstellbar ist.

Eine vorgegebene Endposition für Angleichen und Fügen ermöglicht auch, Höhentoleranzen der Ausgangswerkstücke auszugleichen, da die Wiederholgenauigkeit von Servoantrieben hoch ist.

Neben optimalen Anwärm- und Fügeparametern ist eine korrekte Füge-nahtgeometrie für eine gute Schweißverbindung erforderlich. Durch stabilen Wandaufbau und minimalen Ver-

satz kann eine präzise Positionierung der Fügepartner zueinander erzielt werden, der Einsatz von Führungsrippen hilft Formtoleranzen in einem gewissen Rahmen abzufangen (Bild 3.4).

3.2 Bewegungsanalyse für Linearantriebe

Für jede Phase des Schweißvorganges sind Vorschubbewegungen der entsprechenden Achsen erforderlich. Nachdem diese Bewegungen von einander nicht abhängig sind, kann für jede Achse eine genauere Betrachtung der eindimensionalen Linearbewegung vorgenommen werden. Ein Positioniervorgang für eine Servoachse kann in Bewegungsphasen gegliedert werden (Bild 3.6). Man kann drei Hauptphasen unterscheiden:

- Beschleunigung der Last ($t_1 - t_2$)
- Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ($t_3 - t_4$)
- Verzögerung der Last ($t_5 - t_6$)

Eine vierte Phase ergibt sich für den Fall einer Pause zwischen den Positionierungen, die Servoachse wird durch die Regelung aktiv in Position gehalten. Eine zusätzliche Kraft auf die Last wird unterhalb eines Maximalwertes in dieser Phase keine Änderung der Position bewirken.

Während der Beschleunigungsphase mit $a_1 \leq a_{max}$ erfolgt ein linearer Zuwachs der Geschwindigkeit in der Form

$$v(t) = a_1 t + v_0 \quad (12)$$

bei einer bereits vorhandenen Startgeschwindigkeit mit $v_0 \geq 0$, und damit eine quadratische Zunahme des zurückgelegten Weges

$$s(t) = \frac{1}{2} a_1 t^2 + s_0 \quad (13)$$

beginnend vom Startpunkt bei $s_0 \geq 0$. Für die Phase der Verzögerung mit $0 \geq a_2 \geq -a_{max}$ ergeben sich gleichartige Beziehungen mit anderen Startwerten. Für den hier zu betrachtenden Sonderfall mit $a_2 = -a_1$ ergeben sich gleiche Distanzen und folglich gleiche Zeitdauern für beide Bewegungsbereiche.

Eine dazwischen liegende Phase konstanter Geschwindigkeit $v_1 \leq v_{max}$ mit linear zurückgelegtem Weg

$$s(t) = v_1 t + s_0 \quad (14)$$

ist nur dann vorhanden, wenn die gesamte Positionierdistanz länger als die zurückgelegten Strecken während der Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen zusammen ist.

Damit errechnet sich mit (12) bis (14) die minimal benötigte Zeit für einen vollen Positioniervorgang über s_{max} mit

$$t_{ges} = \frac{s_{max}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a_{max}} \quad (15)$$

und bei kurzen Distanzen, wo die Phase konstanter Geschwindigkeit entfällt mit

$$t_{ges} = 2 * \sqrt{\frac{s_{max}}{a_{max}}}$$

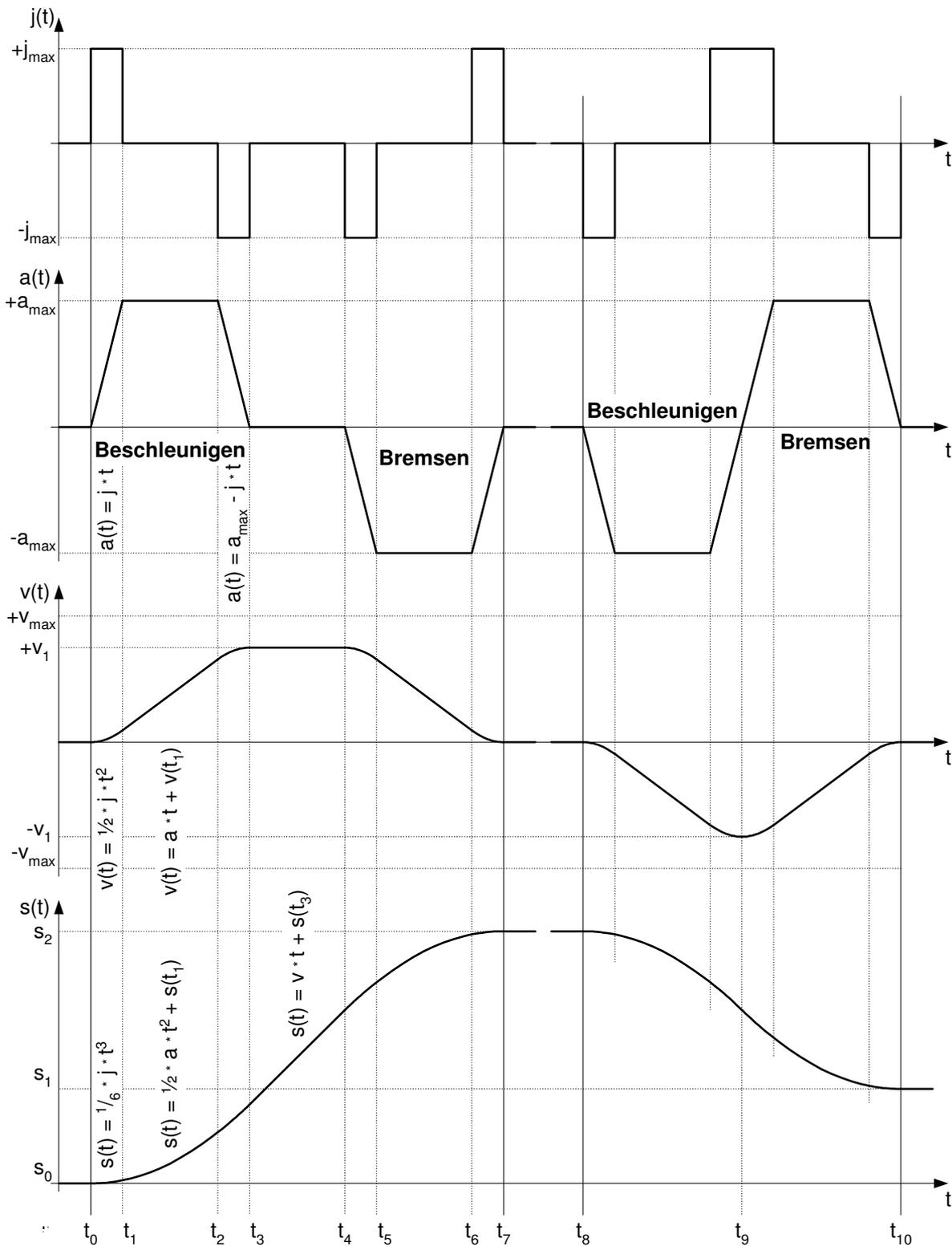


Bild 3.6: Bewegungsphasen eines Positioniervorganges für eine Servoachse

Bei den bisherigen Betrachtungen wurden die Bereiche mit Änderung der Beschleunigung nicht berücksichtigt. Der zu diesem Zeitpunkt entstehende Ruck j (für engl.: *jerk*) ist der Auslöser für Schwingungen der Mechanik. In der Praxis kann das vom Servomotor aufgebraute Moment nicht sprunghaft erzeugt werden, da die verursachende Stromkomponente des Drehfeldes Wicklungsinduktivitäten zu überwinden hat. Damit ist zwar der erzeugbare Ruck auf natürliche Weise begrenzt, allerdings auf nicht definierte Weise. Bei Verwendung modernerer Regelsysteme wie in diesem Projekt ist eine parametrierbare Ruckbegrenzung j_{max} vorgesehen, die gezielt auf die mechanische Anwendung abgestimmt werden kann. Während dieser Teilphase ändert sich die Beschleunigung linear, damit ergibt sich der zurückgelegte Weg allgemein zu

$$s(t) = \frac{1}{6} j_{max} t^3 + \frac{1}{2} a_1 t^2 + v_1 t + s_0 \quad (17)$$

falls ein gemeinsamer Begrenzungswert für alle vier Ruckphasen für Beschleunigung und Verzögerung gewählt wird (Bild 3.6). Dadurch werden aber die Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen verlängert und der Bereich mit konstanter Geschwindigkeit verkürzt.

Die resultierende Zeitdauer für einen vollen Positioniervorgang bei maximal möglichen Positionierdaten und Auftreten aller Phasen wird damit verlängert auf

$$t_{ges} = \frac{s_{max}}{v_{max}} + \frac{v_{max}}{a_{max}} + 4 \frac{a_{max}}{j_{max}} - \frac{5}{3} \frac{a_{max}^3}{j_{max}^2 v_{max}} \quad (18)$$

Bei sehr kurzen Distanzen oder durch Einstellen einer starken Ruckbegrenzung verschwinden sowohl die Bereiche mit konstanter Beschleunigung als auch der Bereich konstanter Geschwindigkeit. Die dadurch errechnete Zeitdauer für eine Positionierung vereinfacht sich zu

$$t_{ges} = 4 * \sqrt[3]{\frac{3 s_{max}}{2 j_{max}}} \quad (19)$$

womit weder die Erhöhung der Geschwindigkeitsvorgabe noch der Beschleunigung auf die Positionierdauer einen Einfluss haben.

3.3 Grundlagen für Servoantriebe

Die Vorschubbewegungen dieser Maschine werden mit elektrischen Servoantrieben durchgeführt. Um einerseits die grundlegenden Eigenschaften von Servoantrieben näher zu untersuchen, und andererseits die notwendigen Ablaufschritte bei der Einbindung der Servoantriebe in das Steuerungsprogramm festzulegen, soll zu Beginn eine Begriffsdefinition mit einer anschließenden Einteilung durchgeführt werden.

3.3.1 Definition und Einteilung der Servoantriebe

Im allgemeinen Sinn handelt es sich bei Servoantrieben um Stellantriebe, die von einem Servomotor angetrieben werden. Ein Servomotor ist eine Einheit, die eine vorgegebene Position anfahren und danach beibehalten kann. Dabei handelt es sich häufig um Gleichstrommotoren oder vektorgeregelte Synchronmotoren. Als häufigste Anwendung sind in der Automatisierungstechnik Linearantriebe sowie Winkelantriebe für Gelenkroboter zu finden. Das Anfahren der Position wird mittels einer Messeinrichtung durch eine Regelung vorgenommen. Als Meßsystem werden unterschiedliche Gebertypen eingesetzt, die im überwiegenden Fall als Winkelgeber auf der Motorwelle aufgebaut sind. Es gibt Systeme mit kontinuierlich arbeitendem Messprinzip wie Resolver oder Potentiometer, digitalisierende Encoder sowie zählende Bauweisen in der Art von Inkrementalgebern. Nur die letztgenannte Form kann prinzipbedingt den Drehwinkel nach Versorgungsabschaltung innerhalb einer Geberumdrehung nicht messen, für alle anderen Bauformen fehlt nur die Anzahl der verfahrenen Umdrehungen. Durch Einbau von mechanischen Getrieben oder elektronischen Nullimpulzzählern mit Hinterlegung in nichtflüchtigen Speichern lassen sich alle Typen erweitern zu Absolutwertgebern, bei denen innerhalb vieler Motorumdrehungen ein eindeutiger Positionsmesswert geliefert werden kann, der dann meist in digital aufbereiteter Form an die Antriebselektronik übermittelt wird.

Bei Systemen ohne Absolutwertgeber muss nach Systemwiedereinschaltung eine Referenzfahrt erfolgen, damit die Anlage die korrekte Nullposition der Achse. In diesem Projekt werden Absolutwertgeber verwendet, die andere Form wird aber ebenso häufig in der Industrie eingesetzt. Damit ist jedenfalls in diesem Projekt eine Referenzfahrt der Achsen nach Einschalten der Versorgung nicht erforderlich.

Eine **erste Einteilung** soll nach dem Antriebsprinzip unternommen werden. Es gibt Linearachsen mit Riemenantrieb für zumeist große Arbeitsweglängen und Linearachsen mit Spindeltrieb für kürzere Hübe, aber hohe Antriebsmomente. Beide Varianten werden oft mit Untersetzungen aus Planeten- oder Zahnriementrieben eingebaut. Diese Unterteilung erfordert unterschiedliche Berechnungsvorgänge bei der Antriebsauslegung, wie nachfolgend gezeigt werden soll.

Eine **zweite Einteilung** kann noch nach horizontaler oder vertikaler Einbaulage der Achse getroffen werden. Bei senkrechtem Einbau der Linearachsen ist meist aufgrund der geforderten Positionierzeiten keine Selbsthemmung der bewegten Masse durch Untersetzungsgetriebe gegeben. Um die Last bei Versorgungsausfall oder Sicherheitsabschaltung nicht absinken zu lassen ist hier der Einbau eines gebremsten Motors erforderlich. Üblicherweise ist eine elektrisch zu lösende Bremse auf der Motorwelle eingebaut, die im aktiven Betrieb gelöst bleibt. Dadurch ist auch bei Stillstand der Achse ein Lastmoment vom Antriebsmotor aufzubringen, das in Wärme umgesetzt wird.

In diesem Projekt werden zwei gebremste vertikale Servoantriebe mit Kugelumlaufspindeln für Spiegelhub und Deckelzuführung und eine ungebremste horizontale Achse mit Kugelumlaufspindel für den Spiegelvorschub verwendet. Der Shuttle für den Batterietransport

wird von einer horizontalen Linearachse mit Riemenantrieb bewegt. Die Servomotoren aller Achsen sind Permanentmagneterregte Synchronmaschinen mit Absolutwertgebern.

3.3.2 Modellierung eines Riemenantriebes

Eine Zahnriemenachse besteht im Grunde aus zwei gezahnten Rollen auf die ein Zahnriemen straff aufgespannt ist. Ein auf dem Riemen montierter Wagen dient zum Ankoppeln der Last, die hier durch Shuttle und Batterien gebildet wird. Der maximal verfahrbare Weg wird durch mechanische Begrenzungen auf einen Bereich kleiner der Rollendistanz eingeschränkt. Eine Rolle wird von einem Servomotor angetrieben, wobei die vergleichsweise niedrige Übersetzung des Drehwinkels zum Fahrweg für viele Anwendungen ein zwischengeschaltetes Übersetzungsgetriebe erforderlich macht (Bild3.7).

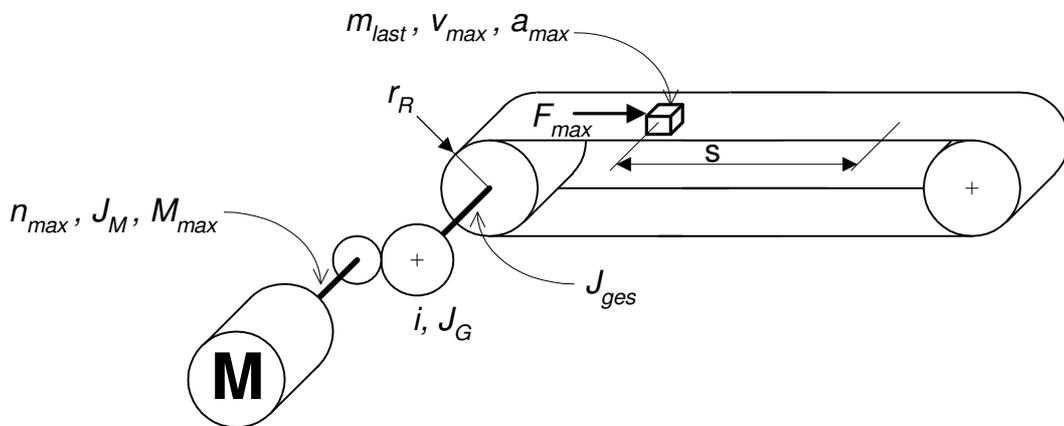


Bild 3.7: Modell eines horizontalen Riemenantriebes

Für den Antriebsmotor seien die maximale Drehzahl n_{max} und das Trägheitsmoment J_M bekannt. Der Motor ist über ein Getriebe mit dem Übersetzungsverhältnis i und dem Trägheitsmoment J_G an die Zahnriemenachse gekoppelt, die über eine Riemenrolle mit Radius r_R und Trägheitsmoment J_R eine Umwandlung des Motormomentes in eine Vorschubkraft durchführt.

Aus der maximalen Drehzahl ergibt sich mit

$$v_{max} = 2\pi r_R \frac{n_{max}}{i} \quad (1)$$

die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Shuttles. Ein auf die Riemenrolle umgerechnetes gesamtes Trägheitsmoment ergibt sich zu

$$J_{ges} = (J_M + J_G)i^2 + 2J_R \quad (2)$$

für die rotierenden Massen von Motor, Getriebe und beiden Riemenrollen. Da sich J_{ges} rechnerisch als am Umfang der Riemenscheibe verteilte Masse darstellen lässt, wirkt

$$m_{zus} = J_{ges} \frac{1}{r_R^2} \quad (3)$$

als zusätzliche Masse zur tatsächlichen translatorisch zu beschleunigenden Masse des Shuttles mit den Batterien.

Das Nennmoment M_n wird hauptsächlich von der thermischen Belastbarkeit des Motors bestimmt und ein Maximalmoment M_{max} ergibt sich hier aus dem vom Umrichter lieferbaren Strom, eine mechanische Grenze oder eine unbeabsichtigte Ummagnetisierung des Motors kann in diesem Projekt nicht erreicht werden. Das im Getriebe übersetzte Antriebsmoment des Motors führt über den Hebelarm r_R zur maximalen Schubkraft an der Last

$$F_{max} = M_{max} \frac{i}{r_R} \quad (4)$$

im realen Fall vermindert um die dagegen wirkenden Reibungskräfte im System. Der Antriebsmotor vermag damit die Last höchstens mit

$$a_{max} = \frac{F_{max}}{m_{zus} + m_{last}} \quad (5)$$

zu beschleunigen.

3.3.3 Modellierung eines horizontalen Spindelantriebes

Bei dieser Art von Linearantrieb wird der Drehwinkel mit einer Kugelumlaufspindel nahezu spielfrei in eine Linearbewegung umgesetzt. Die zu bewegende Last ist an die Spindelmutter angebaut, hier besteht sie aus der Positioniereinheit für den Spiegel, die für einen großen Teil der Maschinenmasse verantwortlich ist. Die gesamte Vorschubkraft wirkt auf die Spindellagerung in axialer Richtung. Die durch die Spindelsteigung festgelegte höhere Übersetzung erlaubt es in vielen Fällen, die Spindel direkt von einem Servomotor anzutreiben. In diesem Projekt ist allerdings ein Zahnriemengetriebe niedriger Übersetzung zwischengeschaltet (Bild 3.8).

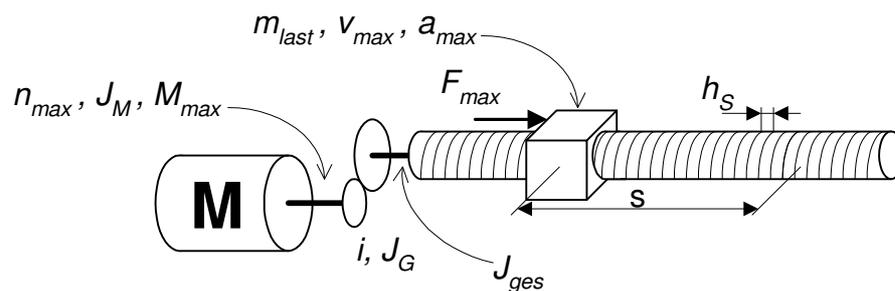


Bild 3.8: Modell eines horizontalen Spindelantriebes

Neben den wie beim Riemenantrieb vorgegebenen Daten für Antriebsmotor und Getriebe sind hier für die Spindel das hohe Trägheitsmoment J_S und die Spindelsteigung h_S gegeben. Die Beziehung (1) ändert sich damit zu

$$v_{max} = h_S \frac{n_{max}}{i} \quad (6)$$

für die maximale Geschwindigkeit. Ein auf die Spindel umgerechnetes gesamtes Trägheitsmoment ergibt sich zu

$$J_{ges} = (J_M + J_G)i^2 + J_S \tag{7}$$

für die rotierenden Massen von Motor, Getriebe und Spindel. Auch hier wirkt

$$m_{zus} = J_{ges} \left(\frac{2\pi}{h_S} \right)^2 \tag{8}$$

als zusätzliche Masse zur tatsächlichen translatorisch zu beschleunigenden Masse des gesamten horizontalen Spiegelschlittens. Das im Getriebe übersetzte Antriebsmoment des Motors führt über den Hebelarm h_S zur Schubkraft an der Last

$$F_{max} = M_{max} \frac{2\pi}{h_S} i \tag{9}$$

In der Realität wird diese Antriebskraft ebenso um die Reibungskräfte im System verringert. Der Antriebsmotor vermag damit die Last nach (5) mit a_{max} zu beschleunigen.

3.3.4 Modellierung der vertikalen Spindelantriebe

Bei vertikaler Anordnung eines Spindelantriebes ist neben dem Moment zum Beschleunigen der Last bei einem Positioniervorgang eine weitere Komponente zum Erhalten der Ruhelage erforderlich. Im abgeschalteten Zustand übernimmt dies eine elektromagnetisch zu lösende Bremse, beim aktiv geregelten Betrieb muss dieses Dauermoment vom Antriebsmotor geliefert werden.

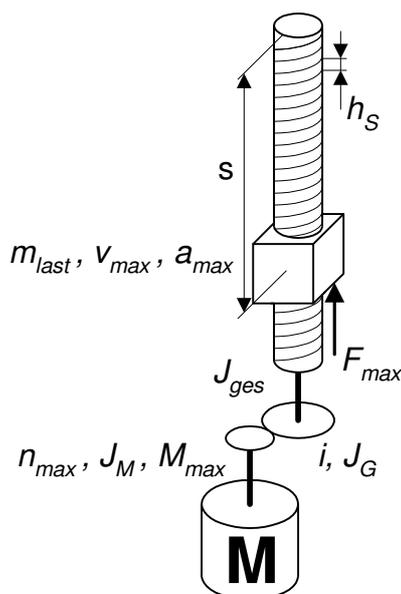


Bild 3.9: Vertikaler Spindelantrieb im Modell

Für die Modellbildung (Bild 3.9) berechnen sich v_{max} , J_{ges} , m_{zus} und F_{max} mit den Beziehungen (6) bis (9) analog zur horizontalen Spindelachse. Die Hubkraft des Motors wird nun allerdings mit der Erdbeschleunigung $g=9,81m/s^2$ um die Gewichtskraft der statischen Masse verringert.

$$F_{hub} = F_{max} - m_{last} g \quad (10)$$

Damit verringert sich auch die maximal mögliche Beschleunigung der Last durch den Motor auf

$$a_{hub} = \frac{F_{hub}}{m_{zus} + m_{last}} \quad (11)$$

beim Heben sowie zum Abbremsen auf Stillstand beim Absenken der Last bei umgekehrter Drehrichtung. Beim Bremsen nach dem Anheben hilft die Gewichtskraft dementsprechend um den gleichen Betrag mit.

Im realen Fall vermindert sich damit im Vergleich zur horizontalen Achse auch die Reibung in den Linearführungen durch Entfall der Normalkomponente der Gewichtskraft, wodurch eine eventuelle Selbsthemmung durch die Spindelreibung alleine unwahrscheinlicher wird.

Als direkte Konsequenz ergibt sich durch das aufzubringende Dauermoment eine im Vergleich zur horizontalen Achse erhöhte Grundleistung, die bei der Antriebsdimensionierung als erhöhte Verlustleistung des Motors berücksichtigt werden muss.

3.4 Qualitätskriterien

Für qualitativ hochwertige Ausführungen der Schweißnähte sind neben korrekten Positioniereinstellungen auch die geeigneten Temperatureinstellungen zu ermitteln. Dies deshalb, da die verwendeten Kunststoffe nicht unbedingt exakt definierte Eigenschaften haben. Die Verwendung von Batteriekästen und Deckeln von unterschiedlichen Herstellern und besonders die Anwendung von Recyclingmaterial haben deutliche Auswirkungen auf die Schweißgüte. Aus diesem Grund ist der Prozess laufend zu überwachen und gegebenenfalls an die veränderten Bedingungen anzupassen.

Kriterien, die eine Beurteilung der Schweißgüte ermöglichen, teilen sich in solche zur erstmaligen Einstellung auf die Produkte, in Kriterien für Stichprobenuntersuchungen, sowie in solche, die für In – Prozessmessungen zugänglich sind.

3.4.1 Einstellungskriterien

Nach einem Typenwechsel ist zumeist die Einstellung des Prozesses erforderlich. Nach Erreichen der Prozesstemperatur des Spiegels und nach Anpassung der Bearbeitungspositionen werden Testdurchläufe gestartet.

Durch eine Unterbrechung des Erwärmzyklus beim Angleichen kann durch visuelle Begutachtung der Fügeflächen erkannt werden, ob ein ganzflächiges Aufschmelzen sichergestellt

ist. Durch so ein Abdruckbild lässt sich zudem die mechanische Einstellung des Heizelementes der Maschine überprüfen.

Wie nach dem Angleichen kann auch nach dem Fügevorgang die Schweißnaht visuell beurteilt werden. Hier ist auf minimalen Versatz und auf einen gleichmäßig ausgetretenen Wulst zu achten.

Eine gut eingestellte Temperatur kann bei korrekter Einstellung der übrigen Prozessparameter in beiden Phasen erkannt werden. Dabei deutet ein hochglänzender Wulst auf eine zu hohe Temperatur oder eine zu lange Anwärmzeit hin. Ebenfalls eine zu hoch eingestellte Temperatur kann bei blasiger, schaumiger Wulstoberfläche der Grund sein, und eine zusätzlich vorliegende Feuchtigkeit kann diesen Effekt noch verstärken. Sichtbare Verfärbungen des Materials sind bereits Anzeichen für eine wesentliche thermische Schädigung der Materialoberfläche.

Durch Fädenziehen macht sich eine zu niedrige Temperatur bemerkbar. Dabei entsteht kein Gaspolster als thermisches Abbauprodukt, wodurch sich der Kunststoff schlecht von der Gussplatte löst.

3.4.2 Stichprobenuntersuchung

Eine aussagekräftige Beurteilung der Festigkeit bei korrekt eingestellten Anwärmparametern wird durch einen Belastungstest erzielt, der nach dem Einstellen, sowie laufend während der Serienproduktion durch Entnahme von Stichproben erfolgt.

Wenn bei einem Abreißversuch die Naht an der Fügeebene reißt, ist das ein Anzeichen für zu geringen Fügedruck, der Werkstoff konnte in der Wulstzone nicht gleichmäßig zu großen Sphäroliten wie im Grundwerkstoff rekristallisieren, da die oberflächlichen bereits kühleren Schichten nicht nach außen gedrängt wurden (Bild 3.4). Falls die Naht großflächig an der Grenze zum Grundwerkstoff reißt, wo sich in dem nur teilweise aufgeschmolzenen Material eine Fließzone aus deformierten Sphäroliten gebildet hat, ist das ein Anzeichen auf zu hohen Fügedruck. Die zu schmale Fließzone hat damit eine zu hohe Kerbwirkung.

Das optimale Bruchbild zeigt einen unregelmäßigen Verlauf durch die gesamte Schweißzone, beginnend beim Wulstrand durch dessen Kerbwirkung.

3.4.3 In - Prozessmessung

Nachdem ein Abreißversuch zerstörenden Charakter zeigt, ist er nicht für die durchgängige Qualitätsbeurteilung der Produktion geeignet.

Eine indirekte Beurteilung der erfolgreichen Schweißung stellt die Prüfung der Polhöhe nach Durchlauf durch den Polschweißautomaten dar, welcher in der Montagelinie an die Deckelschweißmaschine anschließt. Dabei wird ein Meßsystem auf die verschweißte Batterie abgesenkt, um durch Differenzmessung zwischen Deckel und Anschlusspolfläche die korrekte Polschweißung zu prüfen. Der Absolutwert der Batteriehöhe stellt somit ein Grobkriterium für eine ebenso korrekte Deckelverschweißung dar.

Eine direkte Methode zur Überprüfung der Schweißgüte stellt die Dichtheitsprüfung dar. Bei diesem Test wird die sonst dicht verschweißte Batterie über die Einfüllöffnungen mittels Gummistutzen mit Pressluft beaufschlagt. Nach Abschalten der Luftzufuhr kann aus dem Druckabfall auf etwaige Lecks in den Schweißnähten geschlossen werden. Bei Anwendung von ausreichend hohem Druck ist diese Messung gleichzeitig ein Belastungstest für die Schweißnähte, der einem Abreißversuch nahe kommt und trotzdem eine 100% - Prüfung darstellt.

Kapitel 4

Maschinenbedingungen für das Steuerungskonzept

Die bisherigen Analysen betreffen den allgemeinen Prozess des Spiegelschweißens. Da die zur Verfügung stehende Maschine über einige Besonderheiten verfügt, sollen in diesem Kapitel die maschinentechnischen Eigenheiten dieses Prototyps näher beleuchtet werden.

Diese Analysen umfassen die Erzeugung der Schmelzwärme in dieser Maschine und die Bewegungsausführung durch die Servo- und Hilfsantriebe. Die Untersuchung der vorhandenen Möglichkeiten zur Erstellung eines geeigneten Benutzerinterfaces für diese Maschine führt mit der Vorstellung der verfügbaren Softwarewerkzeuge zum Abschluss des Kapitels und führt damit direkt zur Hauptaufgabe, der Erstellung des Steuerungsprogrammes.

4.1 Heizungsregelung

Das Spiegelschweißen erfolgt unter Anwendung eines planen Heizelementes, das auf eine Temperatur deutlich über der Erweichung des Grundmaterials aufgeheizt wird, um einen raschen Formschluss zu ermöglichen. Da die Maschine verschiedenste Batterietypen verarbeiten können soll, wurden bei der Konstruktion flexible Umrüstmöglichkeiten berücksichtigt.

4.1.1 Heizelement

Ein Heizelement für eine Spiegelschweißmaschine in der Batterieproduktion besteht typisch aus einer Messing- bzw. Bronzeplatte mit an der Längsseite eingebohrten Heizstäben. Auf diese für alle Batterietypen einheitliche Grundplatte werden Formplatten aus Stahlguss montiert, die mit dem unterschiedlich ausgeformten Kunststoffmaterial in Kontakt treten.

Für das bei Polypropylen angewendete Hochtemperaturschweißen sollte die Temperatur so gewählt werden, dass an der Grenzfläche zwischen Metall und Kunststoff bereits der thermische Abbau beginnt, es bildet sich ein Gasfilm mithilfe dessen der Kunststoff dann leicht von der Platte lösbar ist. Beschichtungen wie Teflon, die das Verkleben verhindern, stehen nur für Niedertemperaturschweißen unter 260°C zur Verfügung.

Die Gussformen bestehen aus zwei Teilen, einer Unterform für den Batteriekasten und einer Oberform für den Batteriedeckel. Die Unterform ist im Wesentlichen eine ebene Platte mit Löchern, wo die beiden Polstifte durchragen können. Die Oberform ist komplexer aufgebaut, sie besteht aus einer Platte mit erhöhten Stegen, um die spezielle Geometrie des *verdeckten Stumpfstößes* abschmelzen zu können (Bild 3.4), zusätzlich sind in der Platte noch Vertiefungen eingelassen, die die überstehenden Füllstandsmarken im Bereich der Einfüllöffnungen aufnehmen.

Das Heizelement ist so breit, dass es für einige Batterietypen einen doppelten Satz von Formen nebeneinander aufnehmen kann, es können in einem Taktschritt somit zwei Batterien gefertigt werden. Eine exakte mechanische Justierung des Heizelements und der Formplatten ist dafür Voraussetzung.

Die Platte selbst ist mit einer stabilen, aber thermisch schlecht leitfähigen Befestigungsstruktur an der Aufspannplatte der Maschine fixiert. Diese thermische Entkoppelung verhindert zu starke Wärmeverluste an das Grundgestell.

Alle Materialien selbst sind zueinander abgestimmt, um mehrere Aspekte zu berücksichtigen:

- Wärmeleitfähigkeit
- Wärmespeichervermögen
- Wärmeausdehnung
- Wärmeabstrahlung

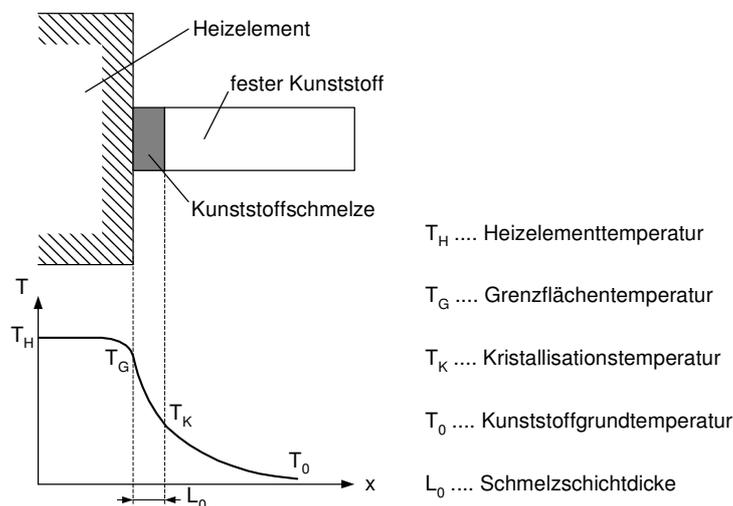


Bild 4.1: Temperaturprofil beim Aufschmelzen von Kunststoff

Gutes **Wärmeleitvermögen** von den Heizstäben bis zur Formoberfläche ermöglicht rasche Aufheizzeiten und gleichmäßige Aufheizung der gesamten Platte. Dabei zeigt Messing ($\lambda=120 \text{ W/mK}$) recht günstige Werte gegenüber dem Gussmaterial der Formen ($\lambda=58 \text{ W/mK}$). Bronze liegt je nach Legierung dazwischen. Schlechte Wärmeleitfähigkeit für die

Heizelementbefestigung hat niedriglegierter Stahl ($\lambda=42$ W/mK) oder Edelstahl ($\lambda=15$ W/mK), die thermische Entkoppelung ist aber vorwiegend durch konstruktionsbedingt niedrige Wärmeleitungsquerschnitte hergestellt. Zusätzlich zur hohen Wärmeleitfähigkeit wird aber noch eine Unterteilung in getrennt regelbare Zonen auf der Heizplatte vorgenommen. Die geringe Wärmeleitfähigkeit von Polypropylen ($\lambda=0,22$ W/mK) erhöht die notwendige Erwärmungszeit für eine ausreichende Schmelzschicht (Bild 4.1).

Hohes **Wärmespeichervermögen** ist notwendig, um den Temperaturabfall während der Anwärmphase des Kunststoffmaterials gering zu halten. Die spezifische Wärmekapazität für Guss ($c=540$ J/kgK) ist deutlich unter PP ($c=1700\dots2500$ J/kgK je nach Temperatur). Dies liegt auch darin begründet, dass der Kunststoff beim Aufschmelzen einen Phasenübergang durchläuft, der Energiezufuhr benötigt. Allerdings ist die zu erwärmende Stoffmenge mit 20...60g Kunststoff je Prozessschritt nicht wesentlich (Bild 4.1).

Die **Wärmeausdehnung** der Materialien darf nicht außer Acht gelassen werden, da sich die Wärmeausdehnungskoeffizienten für Bronze oder Messing ($\alpha=18,5*10^{-6}$) als deutliche Größenänderung des Heizelementes bemerkbar machen. Die vorliegende Platte wächst somit um mehr als 2 mm in die Breite und 6 mm in die Länge bei einer Aufheizung auf Betriebstemperatur. Gussmaterial hat hingegen beinahe die halbe Wärmedehnung ($\alpha=10,5*10^{-6}$), was zu deutlichen Verspannungen bei zu schnellem Aufheizen führen muss. Gleiches gilt für die eingebohrten Heizstäbe, deren Stahlhüllen während der Aufheizphase eine deutlich höhere Temperatur erreichen werden, wie das umliegende Material. Für die Positionierung ist damit zu beachten, dass die Maschine nur im betriebsbereit aufgeheizten Zustand reproduzierbar Punkte anfahren kann.

Die **Wärmeabstrahlung** ist nur bei kontaktlosem Schweißen von Bedeutung, hier wirkt sie sich eher nachteilig durch Energieverlust und unerwünschte Aufheizung anderer Maschinenteile aus. Zur Verminderung der Abstrahlungsverluste kann eine geeignete Oberflächenbeschaffenheit hilfreich sein. Ein wesentlicher Teil der Oberfläche hat einen niedrigen Emissionsfaktor ($\epsilon=0,09$ für Bronze oder poliertes Messing), wodurch Abstrahlung von Wärme hauptsächlich an den Gussplatten erfolgt ($\epsilon=0,8$). Durch Alterung und damit Oxidbildung an der Grundplatte könnte dieser Effekt jedoch verschlechtert werden.

Ein weiterer Effekt mit Einfluss auf die Grenzflächentemperatur ist der Energieverlust durch **Konvektion**. Diese ist kaum zu verhindern, da einerseits das Heizelement durch den Schweißprozess in Bewegung ist, und andererseits eine Abluftanlage für die entstehenden Schadgase aus zersetztem Kunststoff für erhöhten Luftaustausch sorgt.

Die Temperatur der Heizplatte selbst ist nach Kundenanforderung in einem Fenster von 30°C zu halten. Eine andere Quelle empfiehlt eine maximale Abweichung vom Sollwert von +/-5°C für optimale Schweißergebnisse [Dvs03].

4.1.2 Temperaturregler

Durch den geforderten Zielbereich der Heizelementtemperatur ist die Verwendung einer Temperaturregelschaltung notwendig. Der Einsatz einer Speicherprogrammierbaren Steuerung für den Prozessablauf bietet eine Lösung auf Softwarebasis an.

Die eingesetzte Heizplatte ist mit 10 Doppelheizstäben bestückt. Diese werden aus dem Schaltschrank über jeweils ein Halbleiterrelais versorgt, was Verschleißfreiheit für ein häufiges Schaltspiel garantiert. Aus Gründen der Fehlersuche werden die Ströme der Stabpaare überwacht und einer Statusanzeige zugeführt (Bild 4.2).

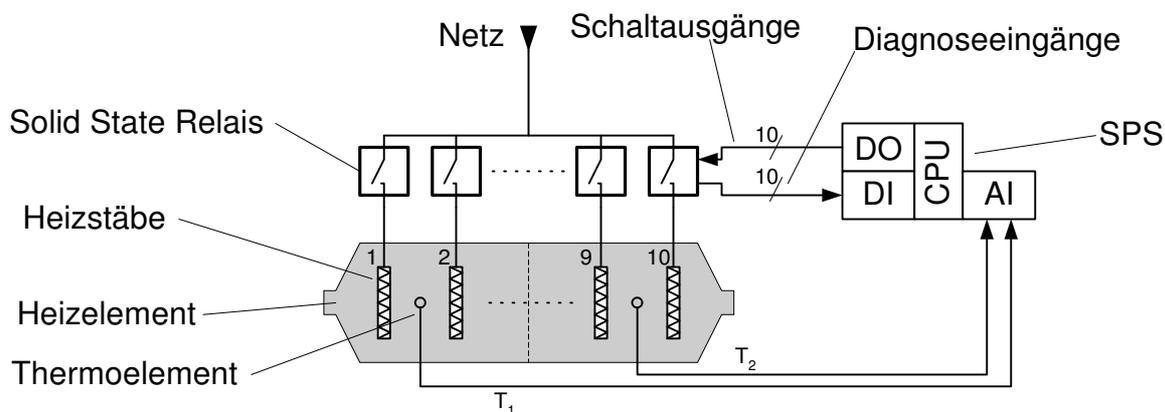


Bild 4.2: Schematische Darstellung des Temperaturreglers

Für eine gleichmäßige Temperaturverteilung auf der ganzen Platte wurde diese in zwei Zonen geteilt, die individuell geregelt werden. Zur Temperaturmessung sind zwei Thermoelemente in Bohrungen der Grundplatte eingebaut, die mit einem geeigneten Analogeingang der Steuerung die Plattentemperatur liefern.

Der Messpunkt selbst liegt nicht in den Gussplatten, sondern wurde aus Gründen der einfacheren Umrüstarbeit beim Typenwechsel in die Grundplatte verlegt. Damit entfällt eine Störanfällige Verkabelung zu den Formen und die Sensoren liegen für alle Typen definiert im geschützten Bereich. Durch die Nähe zu den Heizstäben ist somit auch eine schnellere Reaktion der Regelung auf Temperaturabweichungen der Heizstäbe selbst möglich, wie sie beispielsweise bei Netzschwankungen auftreten.

Nachteilig wirkt sich dieser Aufbau aber auf die Genauigkeit des Prozesswertes aus, da der Ort der zu regelnden Temperatur eigentlich in den Gussformen an der Kontaktfläche zum Kunststoff liegt. Durch die oben genannten thermischen Effekte wird es in jedem Fall ein Temperaturgefälle zwischen dem Messsensor und der Grenzflächentemperatur geben, was bei der Einstellung der Parameter zu berücksichtigen ist. Außerdem wird während des Aufheizvorganges des Heizelementes durch die auftretenden thermischen Zeitkonstanten trotz eines eingeschwungenen Zustands der Regelung die stabile Endtemperatur an der Gussplattenoberfläche noch längere Zeit nicht erreicht sein. Es ist damit eine zusätzliche Wartezeit vor dem Anfahren des Prozesses notwendig, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

Zur Minimierung dieser Pausenzeiten beim Umrüsten wurde die Maschine mit einem kompletten zweiten Kreis ausgestattet, der ein weiteres Reserveheizelement in einer Parkposition außerhalb der Maschine vorheizen kann, um beim Typenwechsel einfach mit dem eingebauten Heizelement im heißen Zustand getauscht zu werden.

4.1.3 Heizleistung

Die Inbetriebnahme einer Heizplatte sollte nicht durch sprunghaftes Aufheizen aus dem kalten Zustand erfolgen, da die auftretenden Spannungen durch Wärmedehnung die Bauteile belasten. Speziell bei länger gelagerten Heizelementen kann sich Feuchtigkeit zwischen Heizstab und Plattenbohrung sammeln, die bei zu raschem Aufheizen beim Ausdampfen behindert wird, und danach explosionsartig unter Beschädigung der Heizstäbe entweicht. Grundsätzlich erreicht jede Heizplatte mit 15kW Versorgungsleistung an den Heizstäben selbst recht rasch die Betriebstemperatur, was für die Spiegeloberfläche nicht mehr gilt.

Damit auch bei voller Heizleistung eine symmetrische Netzbelastung erreicht wird, sind die Heizstäbe durch Aufteilen der Anschaltpunkte auf das Drehstromnetz verschaltet.

Um auch den gesamten Anschlusswert der Maschine niedrig zu halten und somit die Dimensionierung der Zuleitung und der notwendigen Absicherung zu vereinfachen, sollte das in Bereitschaft stehende Reserveheizelement nicht gleichzeitig mit dem für den Schweißprozess eingebauten Element an das Netz geschaltet werden.

4.2 Servoantriebe

Die Positionierung des Heizelementes erfordert einerseits möglichst schnelle und präzise Stellbewegungen, andererseits aber sehr langsame Vorschübe um das Aufschmelzen korrekt durchzuführen. Neben der Heizplattenpositionierung werden die Deckelpositionierung sowie das Verschieben der Batteriekästen mit Servoachsen durchgeführt.

Für diese Servoanwendungen ist hier ein Sinamics – Antriebssatz vorgesehen, dessen Eigenschaften an dieser Stelle näher untersucht werden sollen.

4.2.1 Umrichterelektronik

Der Antrieb der Servomotoren erfolgt über Leistungselektronik, die von Mikrocontrollern gesteuert wird (Bild 3.13). Durch die Rückführung von Motorstrom, Drehzahl und Achsposition in den Controller wird eine Positionierregelung gebildet, die im Zusammenspiel mit den umgebenden modular aufgebauten Komponenten Sicherheit und Zuverlässigkeit des Antriebs gewährleistet.

Die zentralen Komponenten des Leistungsteiles sind die *Motor Modules*, die die gemeinsame Zwischenkreisspannung durch Pulsbreitenmodulation für jeden Motor in ein Dreiphasensystem mit variabler Frequenz und Spannung umwandeln.

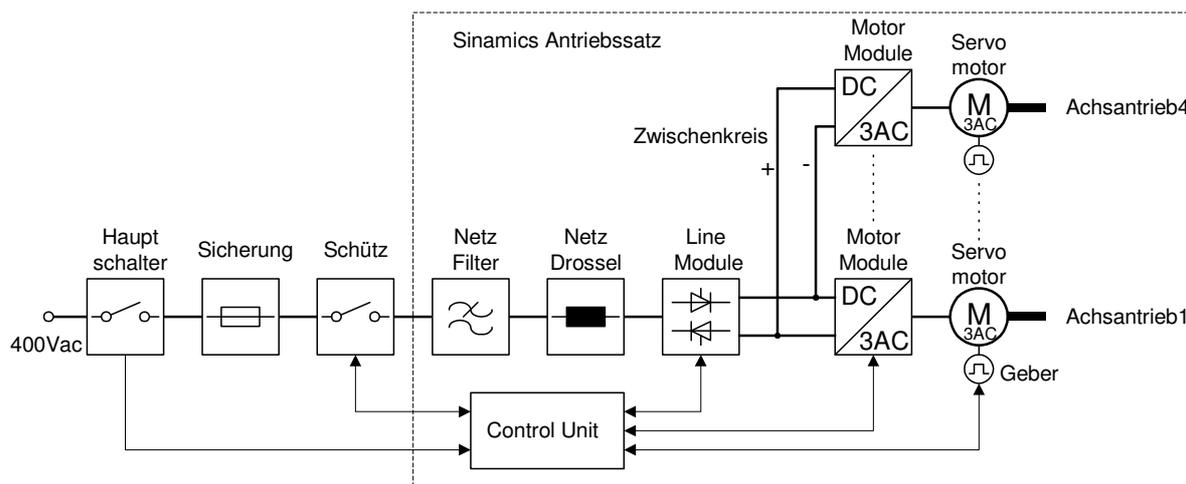


Bild 4.3: Leistungselektronik und Steuerung der Servoantriebe (Sinamics)

Die angeschlossenen Antriebe arbeiten im 4 – Quadranten – Betrieb und können damit beim Bremsen Energie in den Zwischenkreis rückspeisen.

Der Zwischenkreis wird vom *Line Module* durch Gleichrichtung der dreiphasigen Netzspannung versorgt und gepuffert, zur Begrenzung und Glättung des Stromes ist dafür eine externe Netzdrossel erforderlich.

Die Bremsenergie kann durch das rückspeisefähige Line Module in das Versorgungssystem abgeführt werden, wodurch die Gesamtverlustleistung des Antriebes niedrig gehalten werden kann. Falls die Gegebenheiten eine Rückspeisung nicht erlauben, müsste die durch die bewegten Massen gespeicherte Energie in einem eigenen Bremsmodul in Wärme umgewandelt werden.

Zur Unterdrückung von Rückwirkungen der hochfrequenten Schaltvorgänge der aktiven Komponenten in das Versorgungsnetz ist ein Netzfilter vorgesehen, um EMV – Kriterien zu erfüllen.

Für Service- und Sicherheitsfunktionen ist die Versorgung der Antriebe durch das Steuerungsprogramm über ein Schütz abschaltbar. Damit aber die Netzrückspeisung so nicht deaktiviert wird, übernimmt die *Control Unit* des Antriebs die Schützsteuerung und wird ihrerseits vom Steuerungsprogramm angesteuert. Damit können nach einem Abschaltauftrag zuerst die Achsen eingebremst werden, bevor nach einer Zeitverzögerung die Versorgung weggeschaltet wird.

Aus dem gleichen Grund ist die vorgeschaltete Absicherung träge ausgeführt und nur für den Leitungsschutz, nicht aber als Halbleiterschutz dimensioniert, um eine unerwünschte Netzabschaltung zu einem ungünstigen Zeitpunkt zu verhindern und damit die Zwischenkreisspannung in problematischer Weise zu überhöhen.

Ebenso ist der Hauptschalter der Maschine mit einem voreilenden Abschaltkontakt versehen, damit die Meldung der bevorstehenden Netzunterbrechung noch rechtzeitig vom Controller verarbeitet werden kann. Dadurch ist es möglich bereits vor der Trennung vom Netz eine Notbremsung einzuleiten, womit in der verbleibenden Zeit noch ein Teil der in den bewegten Massen gespeicherten Energie über die Versorgung abgebaut werden kann, was speziell bei vertikalen Achsen die automatisch einfallenden Haltebremsen schonen wird.

Speziell zur Notbremsung können Servomotoren vielfach höhere Momente als im Nennbetrieb erzeugen, was die Bremszeit erheblich verkürzt und in dieser Zeitspanne wenig Gefahr für eine thermische Überlastung des Motors oder der Leistungselektronik bedeuten kann.

4.2.2 Besonderheiten der Kaskadenregelung

Die Antriebsregelung der Spiegelschweißmaschine ist dem Stand der Technik entsprechend zum hochdynamischen Betrieb der Servomotoren als volldigitale Kaskadenregelung ausgeführt [Sch98].

Den inneren Teil der Kaskade stellt die Stromregelung dar, dabei werden die erfassten Motorströme der drei Wicklungen durch Umrechnung in ein System aus einer feldbildenden und einer momentenbildenden Stromkomponente transformiert (Bild 4.5). Diese beiden Komponenten werden unabhängig voneinander geregelt und bieten der übergeordneten Regelstruktur durch Umsetzung des Stromsollwertes in ein Sollmoment ein vereinfachtes Modell zur Erzeugung des Drehmomentes für den Servomotor. Die Transformation ist abhängig von der Rotorlage, wodurch eine Rückführung der mithilfe des Drehwinkelgebers gemessenen Lage des Rotors erforderlich ist. Durch diese Methode wird das Maschinendrehmoment mit gleicher Dynamik wie der eingepreßte Strom aufgebaut. Mithilfe von geeigneten Begrenzungen wird der Schutz von Umrichter und Motor gewährleistet. Die Grenzen verhindern eine thermische und elektrische Überlastung des Umrichters sowie Entmagnetisierung des Rotors und Überhitzung der Motorwicklung in den verschiedenen auftretenden Betriebssituationen. Zur Erzielung des gewünschten Regelverhaltens muss die innerste Stufe der Kaskade eine kurze Reaktionszeit aufweisen, da die äußeren Regler in ihrer Geschwindigkeit davon abhängig sind. Die im Antriebssatz verwendete Zykluszeit beträgt $125\mu\text{s}$, was ausreichend klein gegen die Zeitkonstanten der elektrischen Ersatzmodelle der verwendeten Motoren sein wird.

Die dem Momentenregler übergeordnete Reglerstruktur bildet einen Drehzahlregelkreis durch Erzeugen eines Momenten – Vorgabewertes in allen zutreffenden Betriebsarten der Servoachse (Bild 4.6). Der Istwert der Motordrehzahl stammt aus den entsprechend aufbereiteten Daten des auf den Motor angebaute Gebersystems, das die Informationen für Rotorlage zur Felderzeugung, Geschwindigkeit und Achsposition durch interne Berechnung zu liefern hat. Durch Glättung der Daten mithilfe von Filtern und Interpolatoren kann auch bei geringen Drehzahlen ein kontinuierliches Drehzahlsignal aus dem Positionswert ermittelt werden.

Bemerkenswert ist, dass durch die umfangreiche Parametrierbarkeit mit etwa 3000 Parametern für den gesamten Antriebssatz auch ein entsprechender Aufwand zur Inbetriebnahme notwendig ist. Zwar sind die wesentlichen Funktionen mit grafischer Unterstützung parametrierbar, dennoch benötigen einige Einstellungen den Zugang über den Expertenmodus des Systems, wodurch die volle Komplexität ersichtlich wird. Zudem ist die Firmware in der vorhandenen Version noch nicht soweit stabilisiert, dass ein Aufrüsten auf den neuesten Stand für die volle Funktionsvielfalt problemlos durchführbar ist.

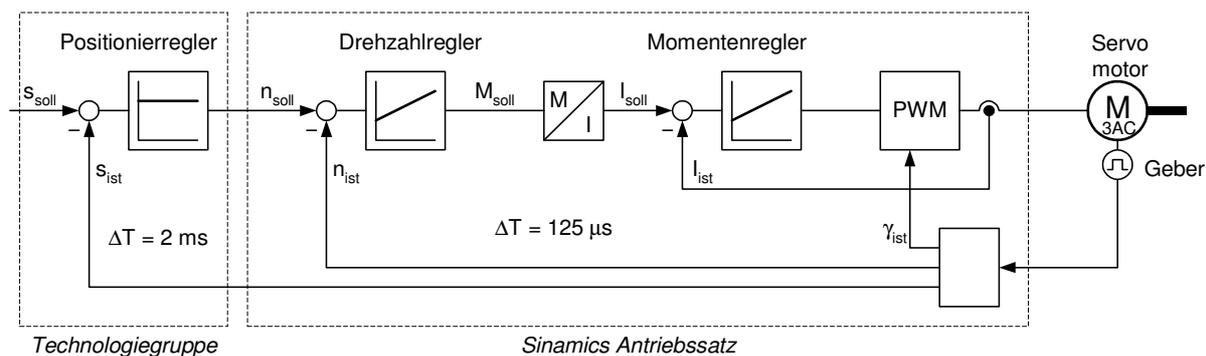


Bild 4.4: Blockdiagramm der verteilten Kaskadenregelung

Der Sollwert des Drehzahlreglers und somit des gesamten Sinamics – Antriebssatzes stammt aus der Technologieeinheit der Simatic – Steuerung (Bild 4.7). Diese enthält zwei Controller die über eine interne Datenkopplung verbunden sind. Einer davon bedient den SPS – Teil der Baugruppe und der andere, der Technologie – Controller, ist mittels Kurvenberechnungen zuständig für die Steuerung von Servoantrieben über die eigens dafür vorgesehene Profibuschnittstelle. Zweck dieser Konstellation ist die Möglichkeit zum Verkopeln von Antrieben zu virtuellen Getrieben oder interpolierten Bewegungen für Bahnkurven. Die Datenübertragung über den Profibus erfolgt zwischen Technologiegruppe und Antrieb synchronisiert in einem Zeitraster, hier von 2ms, was gleichzeitig die Zykluszeit für den Positionierregler darstellt. Durch Reservieren von Zykluszeit für die Antriebsfunktionalität kann eine Busüberlastung wegen beispielsweise zusätzlicher Diagnosedatenanforderung verhindert werden.

4.3 Hilfsantriebe

Neben der Positioniersteuerung für die vier Servoachsen und der Temperaturregelung für die Schweißspiegel sind noch eine Reihe Hilfsantriebe und Funktionen zum Betrieb einer Spiegelschweißmaschine notwendig. Diese sind durchwegs an die SPS gekoppelt, die für den Prozessablauf die Schaltbefehle absetzt und über geeignete Sensorik deren Ausführung überwacht. Da die Spiegelschweißmaschine über elektrische und pneumatische Energie versorgt wird sind dementsprechend zwei Typen von Hilfsantrieben vorhanden.

4.3.1 Elektrisch versorgte Hilfssysteme

Die Erzeugung von Bewegungsenergie aus elektrischer Energie kann für präzise und hochdynamische Positionierung mit den oben beschriebenen Servoantrieben erfolgen. Wo für die auszuführenden Bewegungen weniger Genauigkeit gefordert ist, können kostengünstigere Systeme eingesetzt werden.

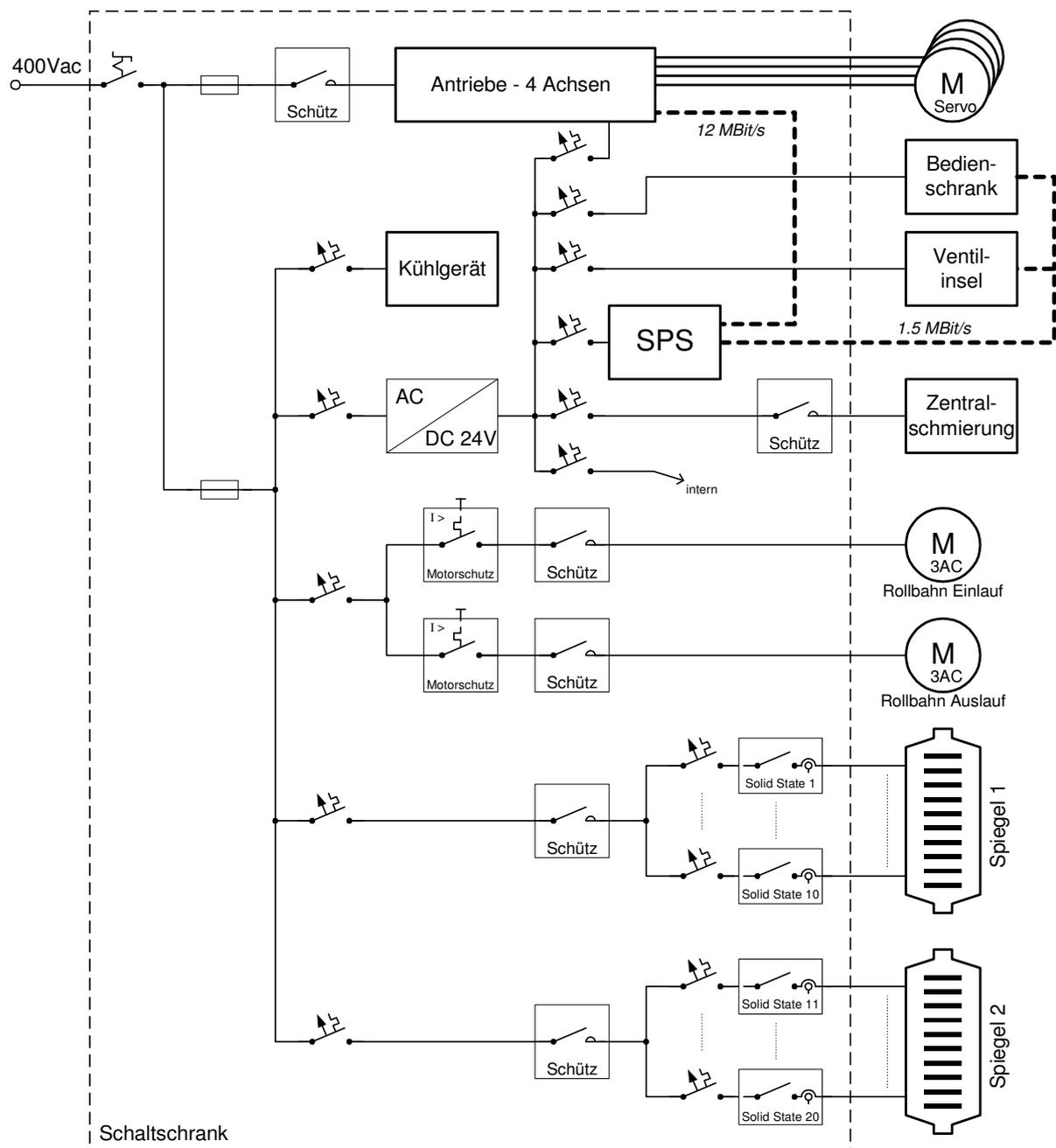


Bild 4.5: Elektrisches Versorgungssystem der Spiegelschweißmaschine

Für den Zu- und Abtransport des Produktes bieten sich einfache motorbetriebene Rollbahnen an, die wegen des kurzen Transportweges praktisch keine Pufferkapazität besitzen und deswegen auch nicht in ihrer Vorschubgeschwindigkeit regelbar sein müssen. Die Ansteuerung der Rollbahnmotoren erfolgt über Schütze, gegen Überlast sind sie mit Motorschutzschaltern gesichert, was über Hilfskontakte an die SPS gemeldet wird (Bild 4.8).

Eine weitere Energieform aus umgewandelter elektrischer Energie wird in der Zentralschmieranlage für die Servoachsen verwendet. Dort erzeugt eine elektrische Förderpumpe Hochdruck im Schmiermittel, das dadurch über Dosierventile an die Linearführungen und Spindelmuttern der Servoantriebe transportiert wird. Nach Einschalten des Pumpenmotors durch die Steuerung werden dieser die Entspannungshübe der Dosierventile angezeigt, die in die Schmierleitung jeder Achse eingebaut sind.

Durch die Verlustleistung der elektromechanischen Komponenten und der Halbleiter zum Schalten der elektrischen Energie entsteht Wärme im Schaltschrank, die zu etwa 75% von den Servoantrieben verursacht wird. Da diese Wärmeleistung von bis zu 1,4kW nicht ausreichend über passive Strahlung der Schrankoberfläche abgeführt werden kann, und Kühlung durch natürliche Konvektion bei offener Bauweise aufgrund der Bleistaubentwicklung in der Produktion kaum möglich ist, muss die Abwärme über ein Kühlgerät aus dem Schaltschrank transportiert werden. Dieses Aggregat ist von außen einstellbar und liefert bei Störung ein Signal an die Steuerung.

Zusätzlich zu den beschriebenen Verbrauchern sind noch Sicherheitssysteme und die Benutzerschnittstelle mit der Steuerung verbunden. Zur Steuerung des pneumatischen Systems ist eine externe Ventilinsel über Profibus an die Steuerung gekoppelt.

4.3.2 Pneumatisch versorgte Hilfssysteme

Für Positioniervorgänge mit nur zwei festgelegten Endlagen eignen sich Pneumatikzylinder sehr gut. Diese werden üblicherweise von elektrisch gesteuerten Ventilen betätigt.

Um eine einfache Luftversorgung zu ermöglichen wird eine Ventilinsel eingesetzt, die die Magnetventile mechanisch zu einer Einheit zusammenfasst, womit die Zu- und Abluftleitungen gemeinsam ausgeführt werden können. Die elektrische Versorgung wird dabei ebenfalls zentralisiert da die Ventile von einem lokalen Controller angesteuert werden, der über eine Profibusverbindung an die SPS gekoppelt ist (Bild 4.8). Um kurze Luftschläuche zu erreichen, ist diese Insel nicht im Schaltschrank positioniert, sondern an einer günstigen Stelle an der Maschine. Damit ergibt sich als großer Vorteil, dass die Ventilinsel über Digitaleingänge verfügt, wodurch fast die gesamte Sensorik der Spiegelschweißmaschine dort gebündelt werden kann. Der überwiegende Teil der Sensoren wird durch die Rückmeldungen der Pneumatikzylinder gebildet, ausgeführt sind sie als Reed Sensoren, die auf in den Kolben integrierte Magneten reagieren.

Die gesamte Pneumatik der Ventilinsel (Bild 3.18) wird über eine Wartungseinheit zur Luftaufbereitung und Druckeinstellung versorgt, der ein Magnetventil als Hauptschalter vorgelagert ist. Hauptfunktionen der vorhandenen Pneumatikzylinder sind die korrekte Positionierung der Batteriekästen im Einlauf, sowie das Klemmen von Batteriekästen und Deckel beim Schweißvorgang. Als Sonderfunktion ist eine Zylindermechanik zum Wechseln des Spiegels eingebaut.

Als erstes durchläuft ein Batteriekasten beim Transport durch die Maschine die Vereinzelung, die aus gegensinnig verschalteten Stoppnern besteht. Dadurch werden definierte Abstände zwischen den Kästen hergestellt, die im Extremfall ohne Abstand angeliefert werden. Grundsätzlich sollte zwar die Prozesszeit kürzer als die der vorgeschalteten Produktionsmaschinen sein, falls aber durch Verzögerungen der nachfolgenden Prozesse die verschweißten Batterien nicht schnell genug abtransportiert werden, bildet sich auch am Einlauf der Spiegelschweißmaschine eine Stauzone. Damit kann der Bereich vor der Vereinzelung als Pufferzone angesehen werden.

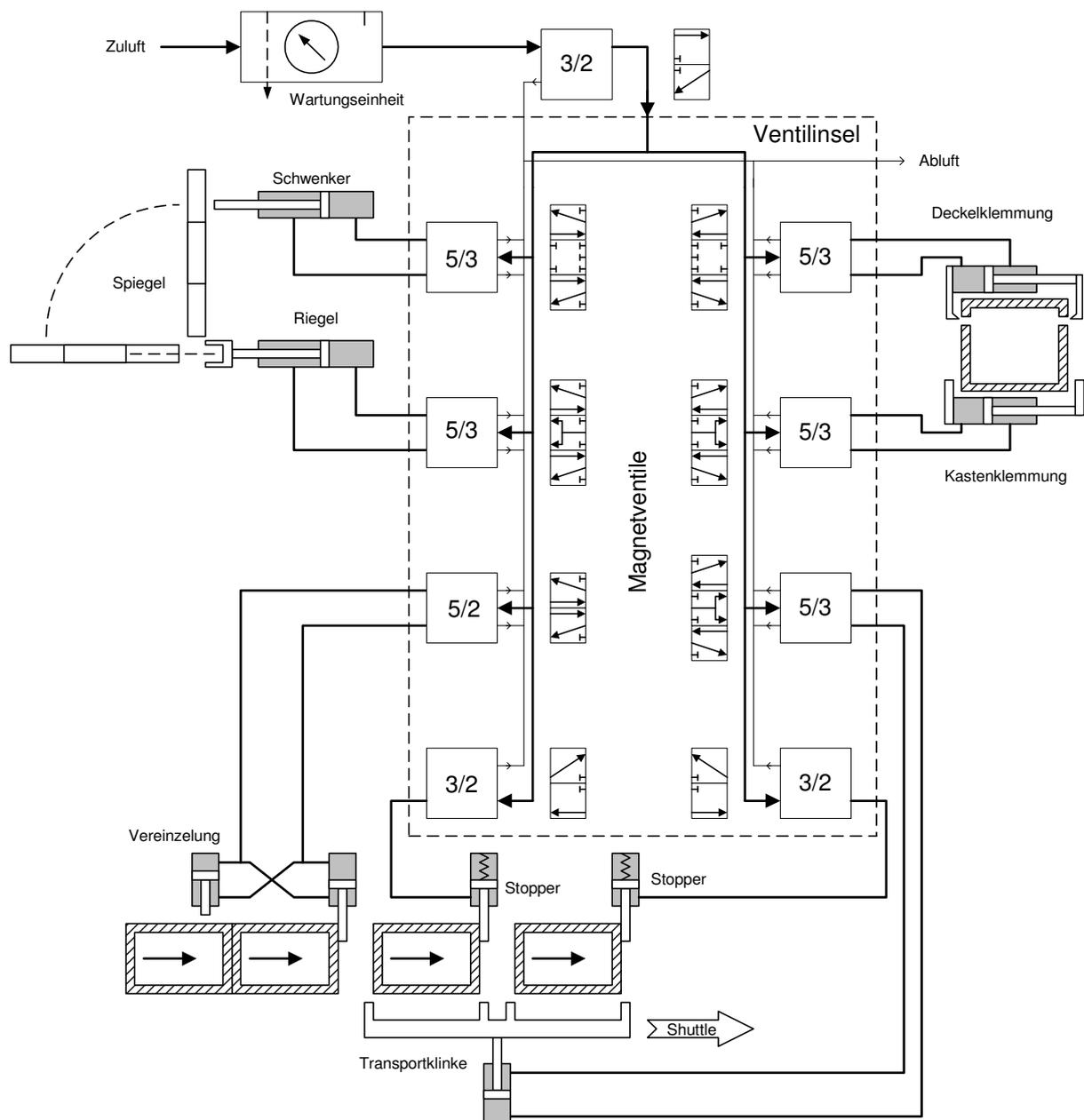


Bild 4.6: Pneumatiksystem der Spiegelschweißmaschine

Die Batterierekennung erfolgt an dieser Stelle mit einer Reflexlichtschranke für den Einzug der Batteriekästen bei Verwendung einer automatischen Deckelzuführungseinrichtung.

Für kleinere Serien ist ein Bedienplatz vor der Vereinzelung vorgesehen zum manuellen Auflegen des Batteriedeckels auf den Kasten, von wo die Maschine diesen dann vor dem Schweißvorgang abholt. Dafür wird der automatische Einzug deaktiviert, und die Vereinzelung mit einem Handtaster für jeden Einziehvorgang geöffnet.

Gleich anschließend befinden sich zwei Positionierstopper, die die einlaufenden Kästen in definierten Positionen festhalten, wo sie von der Transportklinke des Shuttles je nach Typ einzeln oder als Paar abgeholt werden können. Diese beiden Stopper sind einfachwirkend

aufgebaut und mit einer Feder vorbelastet, was auch der Grund ist, warum bei Druckabfall die Kolbenstangen ausfahren und somit indirekt durch unplausible Position ein unzulässiger Abfall des Betriebsdruckes erkannt werden kann. Für bestimmte Batterietypen wird die Transportklinke auf Einzelbatterie umgebaut, wodurch der erste Stopper nach der Vereinzelung immer eingezogen bleiben muss. Bei beiden Stoppern befindet sich eine Reflexlichtschranke zur Batterieerkennung.

Wenn die Batterie bzw. Doppelbatterie in Position gebracht worden ist, bewegt sich die Transportklinke nach vor, um sie festzuhalten. Parallel dazu fixiert ein zweiter Klinkensatz die bereits verschweißten Batterien. Nach dem Einziehen der Stopper wird der Shuttle mit den darauf montierten Transportklinken durch die Servoachse an die rechte Position verschoben, wo dann alle Batterien freigegeben werden. Die unbearbeiteten Batterien befinden sich nun in der Bearbeitungsposition wo sie sofort durch die Kastenklammer festgehalten werden, und die fertigen werden vom Auslaufband abtransportiert.

Die Zeitersparnis dieses Shuttle – Prinzips (Bild 4.10) liegt zum einen darin, dass die Transportdauer vom Maschineneingang bis zum Prozessbereich dadurch verkürzt wird, indem durch Bildung einer Pufferzone die Verschiebegeschwindigkeit trotz langsamer Rollbahngeschwindigkeit erhöht werden kann. Zum anderen werden die Ausräumzeiten der Maschine ebenso eliminiert, da dies gleichzeitig mit dem Beschicken durchgeführt wird.

Beides schafft mehr verfügbare Zeit für den eigentlichen Schweißprozess trotz unveränderter und ungleichmäßiger Beschickung der Maschine.

Ein weiterer Pneumatikzylinder dient zum Festhalten des Batteriedeckels im *Deckelnest*. Diese Einheit ist auswechselbar, da es für die unterschiedlichen Batterietypen individuelle Deckelnester gibt. Im Deckelnest zeigt ein mechanischer Hebel mit Induktivsensor den eingelegten Deckel an.

Die restlichen Pneumatikzylinder werden zum Wechseln des Spiegels benötigt. In Arbeitsposition ist die Grundplatte des Spiegels an seitlichen Laschen mithilfe von zwei Riegeln auf dem massiven Grundgestell eingespannt, um Ausweichbewegungen der Heizform auf dem Kasten beim Aufschmelzen unter Anpressdruck zu verhindern. Für den Spiegelwechsel werden diese Riegel pneumatisch zurückgezogen und der Spiegel samt Halterung mit zwei weiteren Zylindern hochgeklappt. Aus dieser Position kann der Spiegel manuell auf Rollen aus der Halterung seitlich auf eine Ablage geschoben werden, um von der gegenüberliegenden Seite den bereits vorgeheizten Zweitspiegel in die Maschine einzuschieben. Mit dieser Konstruktion ist die Heizplatte einerseits im Betrieb zuverlässig und verwindungssteif eingespannt, andererseits kann sie so mit der pneumatischen Unterstützung mit wenig Stillstandszeit ausgetauscht werden.

Aufgrund der programmabhängigen Ansteuerung der Pneumatikzylinder ist der Luftverbrauch der gesamten Anlage Batterietypenabhängig. Wegen der geringen zu bewegenden Massen mit folglich kleinen Zylinderdimensionen ist der Luftverbrauch durch die Entlüftung der Zylindervolumen in ähnlicher Größenordnung wie die aufzupumpenden Schlauchleitungen der Maschine während eines Schweißvorganges.

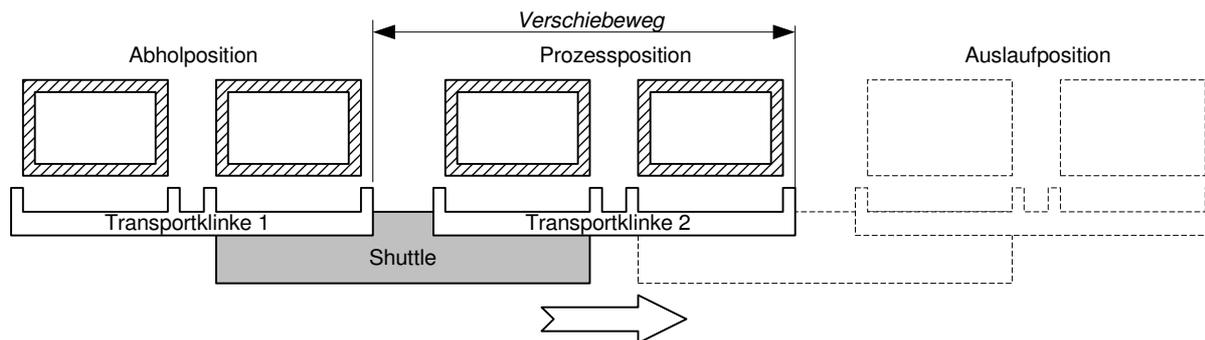


Bild 4.7: Prinzip des Shuttle – Mechanismus

Als Wert für die zu entlüftenden Volumina während eines Betriebszyklus können 2-3 Liter angegeben werden, was einem Luftverbrauch unter Normaldruck in einer Größenordnung von 20 l/min entspricht. Damit soll festgestellt sein, dass der Energieverbrauch durch die Pneumatik vergleichsweise gering gegenüber dem elektrischen Antriebssatz und besonders der Heizenergie ist. Folglich wird auch kaum ein wesentlicher Einsparungseffekt in diesem Bereich erzielbar sein.

Ein einmaliger Spiegelwechsellvorgang benötigt hingegen aufgrund der wesentlich höheren bewegten Masse und der längeren Kolbenwege etwa die 5-fache Luftmenge eines Betriebszyklus. Ein Spiegelwechsel ist aber nur zum Umrüsten der Maschine erforderlich.

4.4 Bedienschnittstelle

Mit der Komplexität einer Maschine steigt im Allgemeinen auch die Vielfalt der Bedien- und Beobachtungselemente. Ohne Zweifel können durch moderne Technik diese Elemente als Mensch-Maschine-Schnittstelle an einer vorteilhaften Stelle zusammengeführt werden um so die wichtigsten Prozessparameter im Überblick und die zugehörigen Eingriffsmöglichkeiten und Anzeigeelemente an der Maschine in effizienter Form zur Verfügung zu stellen. In diesem Projekt wurde eine Bedieneinheit mit elektromechanischen Schaltern und Anzeigen sowie mit einem berührungsempfindlichen Grafikterminal konzipiert.

Dennoch gibt es Bedienelemente, die aus arbeitstechnischen Gründen nicht an der Stelle des Hauptbenutzerinterfaces angeordnet werden können. Damit muss solchen Fällen ein besonderes Augenmerk auf den Bedienvorgang geschenkt werden, um unnötige Wege für den Bediener zwischen den Orten zu vermeiden, da die Maschine in die Montagelinie eingebaut ist, und sich damit längere Strecken zum Umrunden ergeben können.

4.4.1 Externe Bedienelemente

Für die Spiegelschweißmaschine sind diese Bedienelemente nicht am Bedienschrank angeordnet:

- Der Hauptschalter am zentralen Schaltschrank zur Trennung der Energieversorgung hinter dem Fließband ist zur normalen Bedienung nicht notwendig, da auf-

grund der langen Aufheizeiten die Maschine im Normalbetrieb nicht ausgeschaltet wird. Der abgeschaltete Zustand ist am Bedienerplatz durch das dunkle Bedienpanel klar ersichtlich.

- Der Freigabetaster am Batterieeinlauf dient zum Freischalten des Einlaufs bei manuellem Auflegen des Deckels auf den Batteriekasten durch den dort stehenden Bediener. Von dort ist der fehlerfreie Automatikbetrieb der Maschine durch eine grüne Ampel erkennbar.
- Schlüsselschalter an beiden Seiten der Maschine hinter dem Fließband dienen zum Zutritt zum in Bereitschaft befindlichen Spiegel zwecks Reinigung während des Vollbetriebes der Maschine, eventuell durch andere Personen als dem Bediener. Der Zugang zu bewegten Teilen ist aber so nicht möglich. Die Schalterstellung wird am Bedienpanel klar dargestellt. Ohne Betätigen des Schlüsselschalters hält die Maschine aus Sicherheitsgründen an.
- Not-Aus-Taster sind von jeder Position um die Maschine sofort erreichbar und unterbrechen die Versorgung mit Pressluft und elektrischer Energie für die Antriebe. Verriegelte Taster werden einzeln am Bedienpanel angezeigt, eine Rücksetzung des Not-Aus-Zustandes ist nur durch Quittierung am Bedienplatz möglich.
- Absperrhebel und Druckeinstellung für die Pressluft innerhalb der Maschinenumhausung sind im Normalbetrieb nicht zur Bedienung notwendig. Fehlende Pressluft kann nur indirekt erkannt werden über einen Zeitüberlauf bei nicht ausgeführten Positionierbefehlen der Pneumatikzylinder, da keine eigentliche Vorrichtung zur Drucküberwachung vorgesehen ist.

4.4.2 Bedienelemente im Schaltschrank

Zusätzlich zu den Bedienelementen für den Normalbetrieb gibt es eine Reihe von solchen, die nur zur Fehlersuche und –behebung vorgesehen sind. Oft sind diese dann nicht mehr direkt zugänglich, da die Betätigung unter Umständen weiter reichende Konsequenzen haben kann, die nur von Fachkräften überblickt werden können. Aus diesem Grund sind Schaltschränke versperrt, da beispielsweise ausgelöste Sicherheitseinrichtungen neben betriebsmäßigen Überlastungen auch sicherheitsrelevante Ursachen haben können. Im versperrbaren Hauptschrank der Maschine befinden sich folgende Bedien- und Anzeigeelemente:

- Leitungsschutzschalter für die Stäbe der Spiegelheizung, bei Ausfall kann der Zustand über die Diagnoseleitungen als Heizstabausfall erkannt und angezeigt werden.
- Parametriertaster an den Stromüberwachungsmodulen der Solid State Relais dienen zum Einlernen des Nennstroms der Heizstäbe. Eine Abweichung von 1/6 des Nennstroms nach beiden Richtungen erzeugt ein Fehlersignal auf der zugehörigen Diagnoseleitung.

- Motorschutzschalter für die Bandantriebe haben einen Diagnosekontakt zur Erkennung einer Motorüberlastung durch das Steuerungsprogramm.
- Die Leitungsschutzschalter für die Gleichspannungsversorgung erzeugen bei Auslösen in allen Fällen zumindest einen Busfehler, was im Allgemeinen nicht vom Bedienpersonal behoben werden kann.
- Kontrollanzeigen für logische Signale zur Fehlersuche

4.4.3 Bedienschrank

Der Bedienschrank stellt die eigentliche Schnittstelle zur Bedienung der Anlage dar. Hier laufen die Meldungen des Betriebszustandes und die Steuerelemente für den Normalbetrieb zusammen. Grundsätzlich ist die eingestellte Maschine mit wenigen elektromechanischen Knöpfen und Schaltern bedienbar (Bild 4.11). Gründe dafür sind die robuste Bauweise und Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung, sowie ein exakteres Schaltgefühl im Vergleich zum elektronischen Grafikterminal.

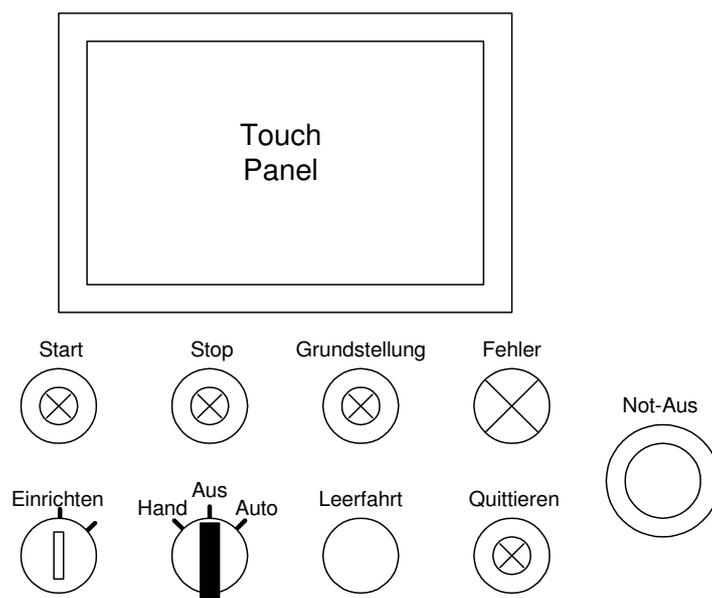


Bild 4.8: Zentrale Benutzerschnittstelle

Eine überwiegende Bedienung durch Schalter erhöht zudem die Lebensdauer des Touch Panels, welches bei Defekten sicher die kosten- und zeitintensivere Reparatur nach sich zieht als der Austausch von Schaltern. Folgende Elemente sind zur grundlegenden Bedienung der Maschine nach geltenden Richtlinien vorhanden [MRL98, MRL06]:

- Betriebsartenschalter in drei Stellungen. Die Mittelstellung „Aus“ schaltet alle Antriebe ab und trennt die Maschine von der Pressluftversorgung. Laufende Positioniervorgänge werden an der momentanen Stelle abgebrochen. Betriebsart

„Automatik“ aktiviert das Ablaufprogramm in den entsprechend ausgewählten Einstellungen. Betriebsart „Hand“ ermöglicht manuelles Positionieren der Servoachsen, sowie individuelles Schalten der Bandantriebe und Pneumatikzylinder. Ein Schweißzyklus ist im Handbetrieb zwar aufwendig, aber prinzipiell durch Einzelschritte durchführbar.

- Die grüne Starttaste dient zum Ausführen des Programms im Automatikmodus und zeigt das durch Beleuchtung des Knopfes an.
- Die rote Stopptaste hält den Automatikablauf nach Fertigstellen des aktuellen Schrittes an und zeigt das durch Beleuchtung des Knopfes an. Ein gestopptes Automatikprogramm kann mit der Starttaste an derselben Stelle fortgesetzt werden.
- Mit der Grundstellungstaste fährt die Maschine in Hand- und Automatikbetrieb alle Achsen nacheinander in ihre Ausgangsposition und setzt die Stopper und Klammern in Grundstellung. Nachdem die Maschine die Grundstellung erreicht hat, leuchtet diese Taste.
- Die Leerfahrttaste startet einen Ausschleibezyklus des Shuttles, um die Transporteinheit von allen Batteriekästen leerräumen.
- Die Fehlerlampe leuchtet bei bestehenden, nicht quittierbaren Fehlerzuständen.
- Wenn die weiße Quittierungstaste leuchtet, kann mit ihr eine vorher aufgetretene fehlerbedingte Unterbrechung quittiert werden. Ohne diese Quittierung ist der selbsttätige Anlauf nicht möglich.
- Ein Schlüsselschalter zum Einrichten erlaubt für befugte Personen einen Zutritt in die Umhausung bei laufender Maschine zur Prüfung von Prozesspositionen. Die Maximalgeschwindigkeiten der Servoantriebe sind dabei auf deutlich verringerte Werte begrenzt.
- Eine Ampelanzeige über dem Bedienerschrank zeigt auch aus der Entfernung den momentanen Betriebszustand der Maschine an. Dabei bedeutet grünes Licht den laufenden Automatikbetrieb, gelbes Licht eine Handbedienung mit jederzeit möglichen Maschinenbewegungen, und rotes Licht ein störungsbedingtes Anhalten bzw. Abschalten der Maschine.

Weitergehende Einstellungen und Anzeigen sind ausschließlich über das berührungsempfindliche Grafikterminal erreichbar.

4.4.4 Bedienpanel

Im Bedienerschrank ist ein Touch Panel mit 10 Zoll Bilddiagonale eingebaut. Auf der damit verfügbaren Bildfläche von 640 x 480 Pixel kann eine Menge an Information in übersichtlicher Weise an den Bediener geliefert werden. Durch die Berührungsempfindlichkeit lassen sich beliebige Tastenfunktionen an frei wählbaren Positionen projektieren.

Die Grundlegende Vorgangsweise beim Erstellen der Bedienoberfläche ist das Erzeugen von Bildflächen mit dem gewünschten Inhalt, zwischen denen mit Navigationstasten gewechselt werden kann. Das verwendete Panel hat keine Verarbeitungskapazität für selbständige Ausführung von Bildwechseln, es kann aber Symbole in den Bildern und die Bildauswahl selbst in Abhängigkeit von Variablen einer angeschlossenen SPS verändern, oder vom Benutzer angeforderte Bildwechsel durch Sperren von Navigationstasten in Abhängigkeit von Variablen verhindern.

Nach dem Einschalten eines Bedienpanels startet es mit einem vordefinierten Grundbild, aus dem die weiterführende Navigation erfolgt.

4.5 Softwarewerkzeuge

Die Umsetzung des Projektes erfordert aufgrund der bereichsübergreifenden Aufgabenstellung eine Aufteilung in mehrere Teilprojekte. Neben den allgemeinen Aufgaben wie die Ermittlung der korrekten Beschaltung für die volle Funktionalität der Hardware und damit für die Verfügbarkeit aller Steuerungsmöglichkeiten oder die Untersuchung der regelungstechnischen Parameter der Maschine zur Auswahl des Konzeptes der Steuerung ist für den Hauptteil dieser Tätigkeit spezielle Software notwendig, die diese voneinander abhängigen Teilgebiete charakterisiert.

4.5.1 Steuerungssoftware

Die zentrale Aufgabe besteht in der Erstellung eines Programms für die speicherprogrammierbare Steuerung, die die Maschine kontrolliert. Durch das vorgegebene Modell CPU315T aus der SIMATIC – Familie wäre zwar noch nicht zwingend Siemens – Software zu verwenden, da auch Software anderer Hersteller zur S7-Programmierung geeignet ist. Spätestens aber bei Einbindung der verwendeten speziellen Hardware ist man auf *STEP7* in der aktuellen Basisversion festgelegt um die Funktion der dafür benötigten Bausteine sicherzustellen.

4.5.2 HMI - Software

Als zweite Teilaufgabe ergibt sich die Erstellung der Bedienoberfläche zur Einstellung der Maschine. Verwendet wird ein SIMATIC TP270, das unter dem Betriebssystem Windows CE läuft. Die Projektierungssoftware dafür ist *ProTool* oder das aktuellere *WinCC flexible* das hier zur Verfügung steht. Beide Programmpakete sind in *STEP7* integrierbar.

4.5.3 Antriebssoftware

Die dritte Teilaufgabe ist die Projektierung und Inbetriebnahme der Servoantriebe. Verwendung findet ein SINAMICS S120 Antriebssystem mit Profibus - Anbindung an die Technologiegruppe der Logiksteuerung.

Grundsätzlich ist für die Inbetriebnahme und Parametrierung der Servoregler das einzelne Softwarewerkzeug *STARTER* vorgesehen. Für die Projektierung des Antriebssystems ist als eigene Komponente das Werkzeug *SIZER* verfügbar.

Alternativ besteht die Möglichkeit, das Engineering System *Drive ES* zu verwenden, womit Projektierung und Parametrierung bzw. Inbetriebnahme der Sinamics - Antriebe durchgeführt werden können.

In diesem Projekt wird nicht die in der Steuerungseinheit der Antriebe eingebaute einfache Positionierfunktion verwendet, sondern die als Drehzahlregler konfigurierten Antriebe von einer über eine Busverbindung ausgelagerten Technologieeinheit der Simatic – CPU als übergeordneter Positionierregler zur Funktion als Servoantrieb zusammengefasst. In dieser speziellen Konstellation ist das für *STEP7* als Optionspaket verfügbare *S7 Technology Toolset* zu verwenden, das die Funktion von *STARTER* eingebaut hat, und die Projektierung über die gesamte Antriebskonstellation hinweg ermöglicht.

4.5.4 Programmiergerät

Neben der in die Maschine eingebauten Hardware ist zur Projektdurchführung eine Entwicklungsumgebung notwendig, die aus einem Siemens – Programmiergerät mit eingebautem Kommunikationsadapter bestehen kann, oder wie in diesem Projekt aus einem Standard – Personalcomputer mit Windows 2000 / XP Betriebssystem mit zusätzlicher Kommunikationsschnittstelle. Geeignete Schnittstellen standen in diesem Fall als PCI – Einsteckkarte, als PCMCIA – Erweiterungskarte sowie als Ethernetadapter zur Verfügung, welche erfolgreich getestet werden konnten.

Je nach Adapter ist somit eventuell noch geeignete Treibersoftware für den Entwicklungsrechner zur Verbindung mit der Steuerung notwendig.

Kapitel 5

Entwurf des neuen Steuerungskonzeptes

Aufgrund der Neukonstruktion der Maschine und der Anwendung eines modernen Antriebssatzes ist es notwendig, das Konzept für die Steuerung von Grund auf neu zu erstellen. Der wesentliche Anteil betrifft dabei die Erstellung des Steuerungsprogrammes. Daran anknüpfend ist die Verbindung mit einer Bedienerschnittstelle zu entwerfen. Grundlegend ist allerdings die Projektierung und Konfiguration des Antriebssystems, ohne das das Ablaufprogramm keine Achsen bedienen kann.

5.1 Entwurf des Steuerungsprogrammes

Das Steuerungsprogramm gliedert sich in zwei Gruppen. Ein Teil dient der Steuerung des automatischen Schweißvorganges und der Materialzufuhr für den eigentlichen, automatisierten Betrieb der Maschine. Die zweite Gruppe umfasst alle Funktionen die zum Einstellen der Maschine und im Servicefall benötigt werden. Im Folgenden wird die für die Maschine entworfene Funktionalität dargestellt, eine detaillierte Darstellung des SPS-Codes würde den Umfang dieser Arbeit sprengen.

5.1.1 Automatischer Ablauf

Der grundsätzliche Vorgang beginnt mit der Vereinzelung der Batteriekästen und nachfolgender Übergabe an den Shuttle. Nach dem Verschieben der Batterien durch den Shuttle wird der Deckel vom Deckelnest aufgenommen, womit die vorbereitenden Funktionen abgeschlossen sind.

Der eigentliche Schweißprozess senkt den Spiegel und den Deckel ab, um die Kunststoffe oberflächlich aufzuschmelzen. Daran anschließend wird der Spiegel entfernt und der Deckel auf den Kasten gesetzt. Nach einer Auskühlzeit ist der Schweißvorgang beendet und die Batterie wird durch den Shuttle beim Verschieben der nächsten Batterie gleichzeitig mit abtransportiert.

Im Schritt 0 des Automatikablaufes (Bild 5.1), der zugleich der Initialisierungsablauf aus jeder Betriebssituation ist, werden die Servoachsen für Spiegelpositionierung und Deckelhalterung, sowie der Shuttle in die Grundposition verfahren. Dieser Vorgang hat in einer definierten Reihenfolge abzulaufen, da einerseits die Achsen kollidieren könnten und ande-

rerseits die Positioniermechanik für den Spiegel sich nicht in jedem Fall kollisionsfrei von einer Batterie entfernen kann. Die Reihenfolge der auszuführenden Schritte:

- Definiertes Öffnen der Deckelklemmung mit Prüfung durch einen Sensor, um beim Achsrückzug einen bereits verschweißten Deckel nicht abzureißen.
- Grundstellungsfahrt der vertikalen Servoachse für den Deckel nach oben.
- Anheben des Spiegels über die überstehenden Batteriepole nach Erreichen der Grundstellung der Deckelhalterung.
- Horizontaler Rückzug des Spiegels in Grundstellung.

Eine andere Initialisierungsreihenfolge kann im Besonderen während der Angleichphase die ineinander positionierte Mechanik oder das Produkt durch Kollision beschädigen. Im vollständig durchgeführten Automatikzyklus wird sich der Spiegel durch das Umstellen selbstverständlich bereits in Grundstellung befinden.

Der Übergang in den nächsten Schritt hängt von einer Startfreigabe ab, die manuell durch einen Freigabeschalter im Einlauf erfolgen kann, oder durch eine Reflexlichtschranke die eine Batterieerkennung auslöst.

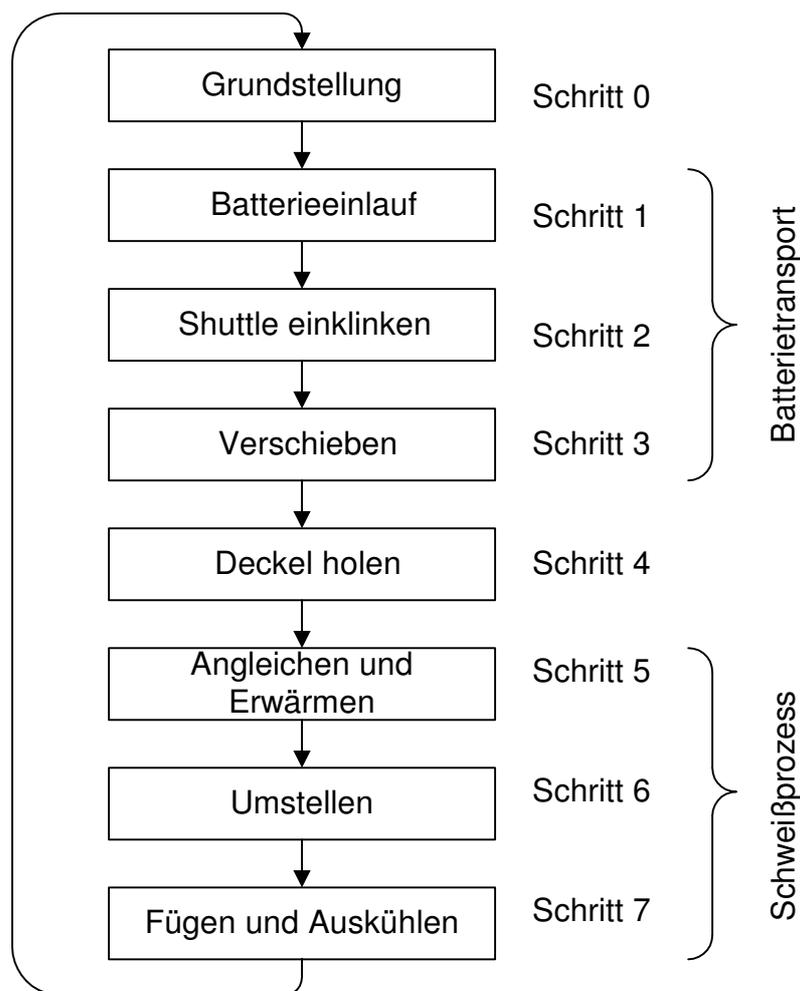


Bild 5.1: Standardsequenz im Automatikbetrieb des Deckelschweißens

Für Schritt 1 des Ablaufes sind folgende Schritte auszuführen:

- Einziehen des Blattstoppers der Vereinzelung, falls in durch die dort angeordnete Reflexlichtschranke einen Batteriekasten anzeigt, und gleichzeitig Ausfahren des Vereinzelungsstoppers, der alle nachfolgenden Batterien festhält.
- Ausfahren des rechten Haltestoppers in der Zielposition und Einziehen des linken
- Nach Ansprechen einer Reflexlichtschranke beim ausgefahrenen Haltestopper, also bei Erreichte der Zielposition, wieder Ausfahren des Blattstoppers und Einziehen des Vereinzelungsstoppers, damit eine neue Batterie zum Einlauf gelangen kann.
- Falls je nach bearbeitetem Typ zwei Batterien bearbeitet werden sollen, wird dieser Vorgang wiederholt unter Zuhilfenahme des zweiten, linken Haltestoppers. Damit sind in diesem Fall zwei Batterien transportbereit im Zielbereich.

Nach erfolgter Positionierung der Batterien im Einlaufbereich erfolgt im nächsten Schritt 2 eine Übernahme der Batterien durch den Shuttle:

- Festhalten der Batteriekästen durch Einklinken der Greifarme in die positionierten Kästen im Einlauf und gleichzeitiges Einklinken in die fertig bearbeiteten Kästen in der Prozessposition.
- Einziehen beider Haltestopper.
- Öffnen der Kastenklemme in der Prozessposition.

Durch diese Maßnahmen ist der Weg für den Schritt3 freigemacht:

- Verschieben aller Batterien durch den Shuttle nach rechts. Damit befinden sich die unbearbeiteten Batteriekästen in der Prozessposition, und die im vorhergehenden Zyklus fertig verschweißten Batterien sind auf das Auslaufband abgestellt worden.
- Klemmen der Kästen in Prozessposition.
- Rückzug der Greifarme und Rückfahrt des Shuttles in Grundstellung.

Schritt 4 dient zur Übernahme des Deckels in das Deckelnest. Die Abholposition ist dabei entweder nach vorhergehendem manuellem Auflegen vom Batteriekasten selbst, oder von einem automatischen Deckeleinleger, der die Deckel über den Batteriekästen der Prozessposition bereitstellt:

- Absenken des Deckelnestes mit geöffneter Klammer auf den Deckel
- Klemmen des Deckels und
- Grundstellungsfahrt des Deckelnestes

Erst danach beginnt mit Schritt 5 der eigentliche Schweißprozess der Maschine.

Da es sich bei dieser Spiegelschweißmaschine nicht um eine Hubtischkonstruktion handelt, ist die Bewegungsführung zum Angleichen des Batteriekastens und des Batteriedeckels nicht unabhängig voneinander auf einen feststehenden Spiegel durchführbar.

Hier wird der Spiegel in Richtung zum feststehenden Batteriekasten bewegt, relativ dazu findet ein Positioniervorgang des Deckels auf den bewegten Spiegel statt. Wegen der gro-

ßen Masse der Spiegelhubvorrichtung ist die Andruckkraft auf den aufzuweichenden Kunststoff des Batteriekastens, die noch dazu von der Andruckkraft des Deckels auf den Spiegel abhängt, kaum mit ausreichender Auflösung und Genauigkeit für ein reproduzierbares Ergebnis über eine Momentenmessung des Servomotors ermittelbar. Deshalb wurde eine lagegeregelte Angleichmethode gewählt (Bild 3.3):

- Vorschub des Spiegels mit den Heizformen mit max. Geschwindigkeit in Prozessposition.
- Absenken des Spiegels mit max. Geschwindigkeit bis auf Kastenkontakt
- Absenken des Deckelnestes mit max. Geschwindigkeit bis auf Spiegelkontakt.
- Öffnen der Deckelklemmung
- Gleichzeitiges langsames Absenken von Deckel und Spiegel bis zur maximalen Angleichtiefe für Deckel und Kasten.
- Wartezeit zum Durchwärmen des aufgeschmolzenen Materials.

Das Öffnen der Deckelklemmung verhindert übermäßiges Aufheizen der Klammern und damit Druckmarken im erweichenden Material. Damit sind die Kunststoffoberflächen definiert abgeschmolzen und der Spiegel kann durch die mit Schritt 6 beginnende Umstellphase entfernt werden:

- Schließen der Deckelklemmung
- Hochheben des Deckels mit max. Geschwindigkeit
- Anheben des Spiegels über die Batteriepole mit max. Geschwindigkeit
- Rückzug des Spiegels mit max. Geschwindigkeit in Grundstellung
- Absenken des Deckels bis auf Kastenkontakt mit max. Geschwindigkeit.

Nach dem korrekten Positionieren der erweichten Materialoberflächen zueinander beginnt die Fügephase mit dem abschließenden Schritt 7 des Schweißvorganges:

- Langsames Absenken des Deckels bis auf Endmaß
- Wartezeit zum vollständigen Erstarren der Schweißnaht

Die Absenkgeschwindigkeit soll dabei so gering eingestellt werden, dass vor der Materialverfestigung das Endmaß noch nicht erreicht ist, womit in der Endlage noch ein Mindest-Fügedruck bestehen bleibt (vgl. Bild 3.5).

5.1.2 Zusatzfunktionen im Automatikbetrieb

Abgesehen von Fehlersituationen oder Bedienereingriffen sind im Automatikbetrieb gleichzeitig noch weitere Abläufe aktiv. Als Grundfunktion ist hier die im Hintergrund laufende Steuerung der Zentralschmierung, die Heizplattensteuerung sowie die laufende Aufzeichnung der Betriebsdaten erörtert:

Zentralschmierung

Die drei Spindelachsen der Maschine sind mit einer Zentralschmieranlage ausgerüstet, die in Abhängigkeit der Anzahl der Schweißzyklen im laufenden Betrieb der Maschine einen minutenlangen Schmierzyklus startet. Dabei liefern mechanische Dosierventile bei Schmiermitteldurchfluss mittels Reedsensor ein elektrisches Schaltsignal für jede Hubbewegung des Pumpelementes im Ventil. Nach Starten des Schmierzyklus wird für eine bestimmte Schmierdauer eine Anzahl von Bewegungen des Pumpelementes ausgeführt, welche proportional zur eingebrachten Schmiermittelmenge ist.

Da jede Achse über ein eigenes Dosierventil verfügt, kann bei Unterschreitung einer vorgegebenen Anzahl von Impulsen eine unversorgte Achse lokalisiert werden, falls beispielsweise eine Leitung platzen sollte.

Zur Erkennung des Füllstandes werden auf ähnliche Weise die Bewegungen eines Pumpenventils im Schmiermittelbehälter als elektrische Impulse gezählt und mit einem Mindestwert verglichen.

Heizplattensteuerung

Die Hauptfunktion dieses Ablaufes ist die Regelung der Prozesstemperatur auf den eingestellten Sollwert in zwei prinzipiell getrennten Regelkreisen, um Temperaturgefälle innerhalb der Platte zu vermindern. Durch die spezielle Anordnung der beiden Temperatursensoren nahe den Heizstäben ist eine einfache Zweipunktregelung ausreichend, um den geforderten Toleranzbereich einzuhalten. Die nachgeschalteten Aufsatzplatten ergeben eine weitere Mittelung der Temperaturschwankungen durch das Schaltspiel des Reglers. Allerdings findet eine bereichsabhängige Begrenzung des Stellwertes durch eine Pulsweitenmodulation des Schaltsignals statt, um eine verringerte Anstiegsgeschwindigkeit der Temperatur während der Anheizphase des Spiegels zu erreichen.

Der generelle Ansatz einer klassischen digitalen Regelung wurde deswegen nicht verwendet, da der Einsatz von Spiegeln und Aufsatzplatten mit unterschiedlichen regelungstechnischen Eigenschaften zu erwarten ist, die ein Nachstellen der Reglerparameter erfordern würden, welche aber zum Zeitpunkt der Programmerstellung nicht zur Verfügung standen.

Bei Ausfall eines einzelnen Heizstabes ist grundsätzlich wenig Auswirkung auf die Prozesstemperatur zu erwarten, da die gesamte geregelte Heizung über ausreichend Reserven verfügt. Aus Gründen der Fehlererkennung ist jedes Stabpaar durch ein eigenes Solid-State-Relais mit Stromüberwachung angesteuert. Damit kann der Heizstrom mit einem vorher parametrisierten Referenzstromwert verglichen werden. Bei Abweichung während des bestromten Zustandes von 6% von der Referenz wird ein Fehlersignal an die Steuerung gemeldet. Das ermöglicht die Erkennung von sowohl Drahtbruch oder Kurzschluss als auch Ausfall eines einzelnen Heizstabes des versorgten Paares. Welcher der beiden defekt ist, kann nur indirekt über eine Widerstandsmessung im Serviceeinsatz festgestellt werden, da immer zwei Elemente unterschiedlicher Anschlussleistung zu Paaren zusammengeschaltet wurden. Diese Erkennung funktioniert allerdings nur über einer minimalen Einschaltzeit des Solid-State-Relais, da die Fehlererkennung verzögerungsbehaftet ist.

Datenaufzeichnung

In das Steuerungsprogramm wurde eine Reihe von Protokollierungsfunktionen eingebaut, die zur Abfrage von Daten von einem übergeordneten System bereitgestellt werden:

- Eine Schichtdatenaufzeichnung dient mithilfe eines Stückzahlzählers zur Archivierung der gesamten Stückzahl einer Schicht. Dabei wird die bis zum Schichtwechsel um 6:00 Uhr, 14:00 Uhr und 22:00 Uhr aufgelaufene Stückzahl in einem Datensatz gespeichert und der Schichtzähler zurückgesetzt.
- Ein weiterer Zähler zählt die gesamte Stückzahl einer Batterietype ohne Rücksetzung zu den Schichtgrenzen für die Auswertung von Produktionsaufträgen.
- Mit einem dritten Zähler wird die Anzahl der aktiven Betriebsstunden protokolliert, sie ist als Maßstab der Alterung der elektronischen Komponenten anzusehen.
- Und ein vierter Zähler zählt die Anzahl der tatsächlichen Schweißvorgänge. Sie unterscheidet sich von der Stückzahl dadurch, dass bei manchen Batterietypen zwei Batterien gleichzeitig bearbeitet werden. Diese Angabe dient als Maßstab für den Verschleiß der Mechanik und wird deswegen zur Steuerung der Zentralschmierung eingesetzt.

5.1.3 Handbetrieb

Durch Umstellung der Maschine in den Handbetriebsmodus wird der Automatikzyklus gestoppt, und alle Stellglieder können einzeln betätigt werden. Dies betrifft im Wesentlichen alle Aktoren mit binären Zuständen wie Pneumatikzylinder oder Rollbahnen.

Zur Betätigung der Servoachsen werden diese im Tippbetrieb solange mit niedriger Geschwindigkeit in eine Richtung bewegt, solange die entsprechende Steuertaste gedrückt bleibt. Diese Tippgeschwindigkeit ist in drei Stufen veränderbar.

Zur Durchführung dieser Aufgabe wird dabei die Achse statt dem Positioniermodus im geschwindigkeitsgeregelten Modus betrieben. Die Überwachung der erlaubten Endpositionen bleibt dennoch wie im Automatikmodus aktiviert.

Grundstellungsfunktion

Eine Funktion, die in jeder Betriebsart und aus jeder Situation verwendbar sein sollte, ist die Grundstellungsfunktion. Mit ihr wird die Maschine wieder in einen definierten Grundzustand überführt, aus dem heraus dann die entsprechende Funktionalität gewählt werden kann. Da viele Situationen zwingend eine Ablaufreihenfolge vorgeben, um Kollisionen zu vermeiden, ist meist eine Teilautomatik notwendig, die auf die entsprechenden Vorbedingungen Rücksicht nimmt.

Wenn aber in jeder Unterfunktion von vornherein eine Grundstellungsfunktion eingeplant wird, ist es meist ausreichend, die Maschine für kurze Zeit in einen Automatikbetrieb zu

versetzen und diese entsprechenden Funktionen auszuführen, bis wieder nach Erreichen der Grundstellung selbsttätig in die entsprechend eingestellte Betriebsart gewechselt wird.

Die wichtigsten auszuführenden Funktionen für eine Grundstellungsfahrt sind:

- Grundstellungsfahrt der Shuttlesteuerung
- Rücksetzen der Rollbahnsteuerung
- Grundstellung des Deckelnestes
- Grundstellung der Spiegelpositioniereinheit bei einsatzbereitem Spiegel.
- Grundstellung nach Spiegelwechsel mit aufgestelltem Spiegel
- Grundstellung aus der Transportposition der Maschine

Da speziell im Handbetrieb Positionskombinationen einstellbar sind, für die kein Automatikbetrieb vorgesehen ist, ist in einigen Situationen die automatische Grundstellungsfunktion deaktiviert, wodurch zuerst mittels Handbetrieb die entsprechende Achse in einen gültigen Bereich gebracht werden muss, bevor die Grundstellungsfunktion aktiviert werden kann.

5.1.4 Servicefunktionen

Für Einstell- und Servicearbeiten sind Funktionen verfügbar, die diese Arbeiten unterstützen sollen. Dabei sind einige Funktionen automatisierte Abläufe von mehreren Einzelfunktionen, andere wiederum steuern direkt als Grundfunktion das Stellglied. Als teilautomatisierte Abläufe werden der Spiegelwechsel und die Referenzstellung beschrieben.

Spiegelwechsel

Die Spiegelschweißmaschine hat als konstruktive Maßnahme zur Unterstützung für Aus- und Einbau der Heizplatten eine verriegelbare Schwenkvorrichtung erhalten, die mit Pneumatikzylindern angetrieben wird. Das aus dem Grund weil der Spiegel einerseits unhandlich gewichtig ist und andererseits auf bis zu 400°C aufgeheizt wird. Zum Wechseln muss der waagrechte Spiegelvorschub in die Ausbauposition gefahren werden, und die vertikale Spiegelachse auf die korrekte Höhe zum Ausschieben abgesenkt werden. Danach sind die beiden Verriegelungszylinder zu öffnen, die den Spiegel starr fixiert haben, und schließlich kann die gesamte Spiegelhaltevorrichtung hochgeschwenkt werden um den Spiegel manuell zu wechseln.

Grundsätzlich kann dieser Ablauf im Handbetrieb durch Positionieren der Achsen und Steuern der richtigen Zylinder erreicht werden. Zur Erhöhung des Komforts ist eine Automatikfunktion eingebaut, die den Ablauf in der richtigen Reihenfolge durchführt. Mit der Grundstellungsfunktion läuft der Ablauf in umgekehrter Richtung ab.

Referenzstellung

Die Spiegelschweißmaschine hat zwar Absolutwertgeber zum Auffinden der richtigen Position auch nach Versorgungsausfall. Nach mechanischem Zerlegen oder Motortausch muss allerdings die korrekte Nullposition wieder eingestellt werden. Dafür besitzt die Maschine Referenzpositionen mit steckbaren Bolzen, die auch zur Achsfixierung beim Transport der gesamten Maschine verwendet werden können. Für zwei Achsen sind diese Positionen mit der Grundstellung ident.

Für die beiden Achsen der Spiegelpositioniereinheit liegen sie an anderer Position. Für Überprüfungs- sowie zum Motorservice können nun diese Positionen per Tastendruck exakt angefahren werden um auch diese Bolzen stecken zu können.

Die Ausführung darf aber nicht aus jeder Position erfolgen können, da hier Kollisionsgefahr besteht.

5.2 HMI Oberflächenerstellung

Nach Einbau der Funktionalität in das Steuerungsprogramm ist eine grundlegende Bedienung und Anzeige über die elektromechanischen Komponenten des Bedienschranks als direkte logische Eingangs- und Ausgangsinformationen bereits möglich. Der größte Teil der Funktionalität wird allerdings durch das Touch Panel gebildet, wo Bedien- und Visualisierungselemente auf engerem Raum mit größerer Übersichtlichkeit dargestellt werden können.

Der grundsätzliche Aufbau besteht aus einzelnen Bildern mit Bedien- und Visualisierungselementen, die über Variablen gesteuert werden und Steuerfunktionen übernehmen.

Die Kommunikation mit dem Prozess erfolgt über den Zugriff des Terminals auf Variablen und Datenbausteine in der SPS, die in einem einstellbaren Zeitraster mit den internen Variablen des Terminals synchronisiert werden. Es erfolgt aber nur die Synchronisation der gerade aktiv benötigten Variablen, das sind im Wesentlichen die gerade im aktuellen Bild verwendeten.

Als zusätzliche Variable können Fehlerwörter definiert werden, die in der SPS aus einzelnen Fehlerbits zusammengebaut werden. Diese wenigen Variablen werden zusätzlich übertragen, so dass bei Auftreten von Fehlern und Warnungen entsprechend gespeicherte Fehlermeldungen ausgegeben werden können.

Diese Fehler- und Betriebsmeldungen können in einem Diagnosearchiv gesammelt werden, wo sie nach Quittierung wieder gelöscht werden. Gleichzeitig kann ein größeres Archiv angelegt werden, indem alle Meldungen chronologisch gesammelt werden, um Betriebsvorgänge später nachvollziehen zu können.

5.3 Reglerparametrierung

Vor Erstellen des kompletten Steuerungsprogrammes der SPS sind mithilfe des Technologiepaketes die Sinamics – Antriebe in das Projekt einzubinden, um sie aus dem SPS-Programm steuern zu können. Nach Einbindung der Hardware und Aktivierung der Kommunikation zwischen den Busteilnehmern kann eine Verbindung zwischen dem Programmiergerät und dem Antriebssystem aufgebaut werden. Da alle verwendeten Komponenten des Antriebes über ein „elektronisches Typenschild“ verfügen, kann die Identifizierung der Komponenten weitgehend automatisiert durchgeführt werden. Zusätzliche Hardware wie ein Netzschütz oder die Abschaltung durch eine Not – Halt - Funktion sind über die Konfiguration der flexibel verwendbaren Eingänge und Ausgänge manuell einzubinden.

Nach korrektem Verschalten der internen Signalwege mithilfe des Konfigurationswerkzeuges können die Servoantriebe vom Programmiergerät aus als Drehzahl-Stellantriebe bedient werden und deren regeltechnische Parameter über die eingebauten Inbetriebnahmefunktionen untersucht und optimiert werden.

Die nun lauffähigen drehzahleregelten Antriebe sind im zweiten Schritt als Positionierantriebe in der Technologiegruppe zu konfigurieren. Nach Einstellen aller entsprechenden Parameter für eine Abbildung der tatsächlichen Mechanik auf das Modell in der Achssteuerung können wiederum Untersuchungen und Optimierungen mit einem weiteren Inbetriebnahmewerkzeug an der nun als Positionierregler gesteuerten Servoachse durchgeführt werden. Beide Untersuchungen werden im nachfolgenden Kapitel 7 diskutiert.

Nach Abschluss der Konfiguration und Parametrierung werden die notwendigen Funktions- und Datenbausteine für den Simatic – Teil der CPU erzeugt werden, womit die Antriebe danach vollständig aus dem SPS-Programm gesteuert werden können, und viele Antriebsdaten aus Datenbausteinen auslesbar sind.

Für grundlegende Einstellungen, wie Änderung an eingestellten Grenzen sind wiederum die Inbetriebnahmefunktionen von Antrieben oder Technologiegruppe heranzuziehen.

Neben diesen Reglereinstellungen ist eine Reihe von Hardwarefunktionen einzustellen. Da die Sinamics - Antriebe über ein durchgängig zweikreisiges Sicherheitssystem für *Not – Halt* und *Not – Aus* Funktionalität unabhängig von einer übergeordneten Steuerung verfügen um die aktuellen Sicherheitsvorschriften zu erfüllen, ist eine Anpassung an die tatsächlich aufgebaute Hardware notwendig. Dazu verfügt die *Control Unit* des Antriebes über frei verwendbare Eingänge und Ausgänge, die nach elektrischer Verdrahtung mit Netzschütz und externem Not-Aus-Relais auch durch interne Signalverbindungen an Funktionen gekoppelt werden.

Kapitel 6

Erhebung des Optimierungspotentials

Der Entwurf des obigen Steuerungskonzeptes ist wohl für die Serienproduktion geeignet. Allerdings ist eine Reihe von Optimierungen möglich, die den Prozess direkt betreffen, wie Taktzeitverkürzung und Anpassungen für Energieverbrauch und Verschleiß. Weitere Optimierungen betreffen das Benutzerinterface durch Erhöhung des Bedienkomforts im Normalbetrieb sowie für Service und Umrüsten, sowie bei der Inbetriebnahme der Maschine.

6.1 Taktzeitverkürzung

Die Verkürzung des Bearbeitungszyklus für einen Schweißvorgang kann durch verschiedene Methoden erreicht werden. Ein Weg ist die grundsätzliche Untersuchung des gesamten Ablaufes zur Ermittlung von Potential für Zeitersparnis. Eine weitere Möglichkeit ist die grundsätzliche Verkürzung der Achsfahrzeiten und letztlich kann durch Untersuchung des eigentlichen Schweißvorganges ebenso Zeit gewonnen werden.

6.1.1 Parallele Abläufe

Der im vorigen Kapitel entworfene Grundablauf des Automatikbetriebes bietet Verbesserungspotential, wenn die Schrittkette des Ablaufes in Teilprozesse zerlegt wird, die dann teilweise parallelisiert werden können. Dazu ist eine Analyse des Vorganges notwendig:

- Der Schweißprozess als Kern des Ablaufes benötigt lediglich drei der vier Servoachsen, er ist eindeutig als eigenständiger Ablauf erkennbar. Was daneben gleichzeitig abläuft, hat keinen Einfluss, solange der Batteriekasten in Position verbleibt.
- Der Transportprozess des Shuttles zum Verschieben der Batterien kann zwar erst gestartet werden, wenn die Batterien im Einlauf positioniert sind und der Schweißprozess beendet ist, dafür kann der Rücklauf des Shuttles unabhängig von allen anderen Vorgängen erfolgen.

- Der Einlaufprozess der Rollbahnsteuerung zum Transport der Batteriekästen in die korrekte Position kann während des Schweißvorganges erfolgen, solange die Greifarme des Shuttles die Einlaufzone nicht blockieren.
- Bei Verwendung eines automatischen Deckeleinlegers kann das Bestücken des Deckelnestes unabhängig von Einlaufprozess und Shuttle erfolgen, allerdings in jedem Fall genau vor Beginn des Schweißprozesses. Damit kann dieser Teil dem Schweißprozess zugeordnet werden, da nur dort die Servoachse des Deckelnestes in Betrieb ist.

Zur Synchronisierung der Prozesse sind Freigabekriterien erforderlich, die die Abhängigkeiten untereinander einbeziehen (Bild 6.1).

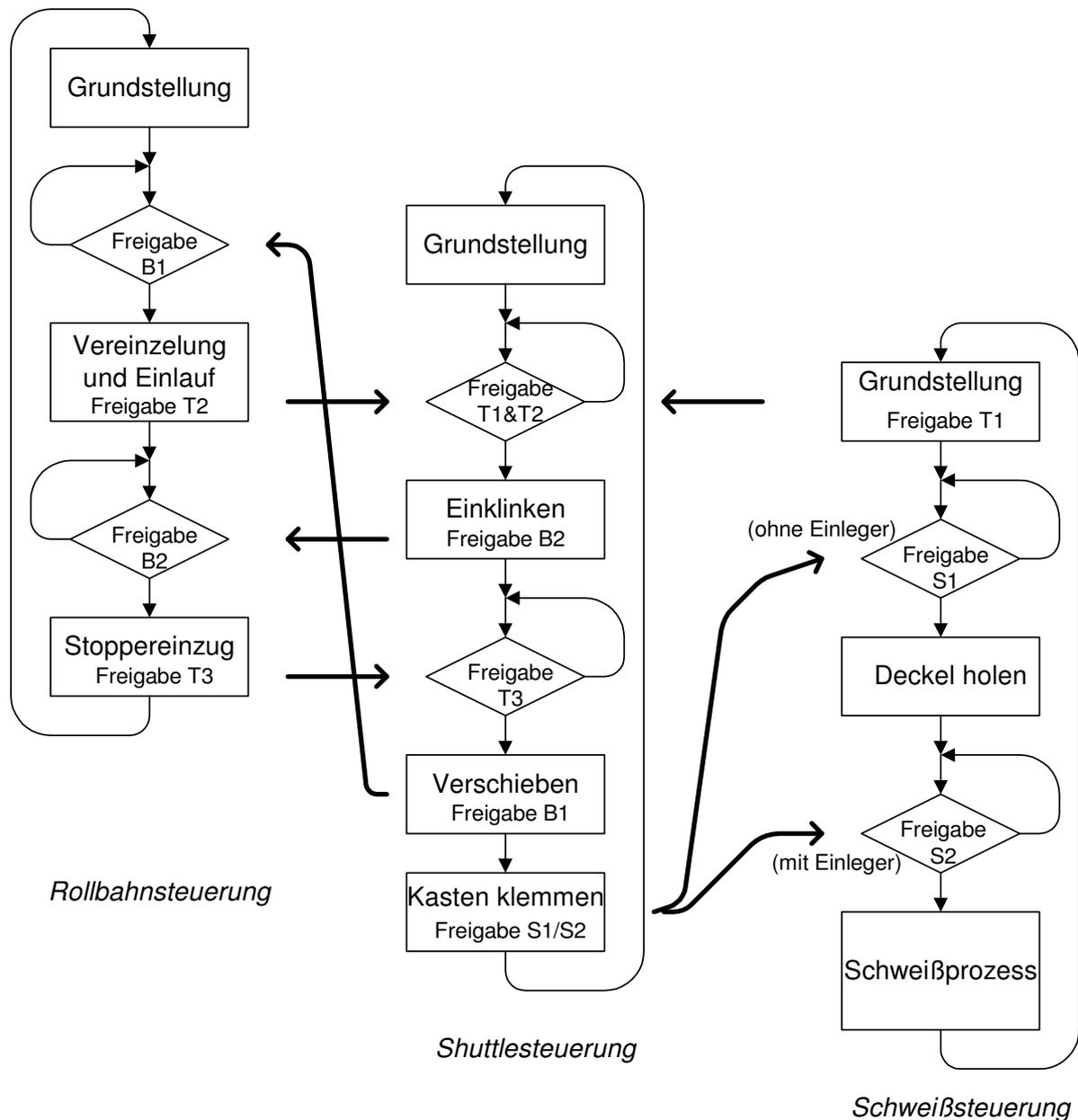


Bild 6.1: Abhängigkeiten der parallelen Automatikabläufe

Folgende Freigabesignale steuern die Interaktion der drei aufgetrennten Prozesse Rollbahnsteuerung, Shuttlesteuerung und Schweißsteuerung:

- Signal *Freigabe B1* wird bei Rückzug der Greifarme des Shuttles gesetzt und ermöglicht der Rollbahnsteuerung den Einlauf von Batteriekästen, nachdem der Weg freigegeben ist.
- Signal *Freigabe B2* wird bei Einklinken der Greifarme in die positionierten Batteriekästen gesetzt, was der Rollbahnsteuerung anzeigt, alle Stopper zurückzuziehen, um das Verschieben zu ermöglichen.
- *Freigabe T1* zeigt der Shuttlesteuerung das Beenden des Schweißzyklus an.
- *Freigabe T2* zeigt ebenfalls der Shuttlesteuerung die im Einlauf positionierten Batterien an, somit kann bei Vorhandensein von *T1* der Einklinkvorgang gestartet werden, ohne durch eventuelle Bewegung der bearbeiteten Batterie den Schweißvorgang zu gefährden.
- *Freigabe T3* zeigt der Shuttlesteuerung die eingezogenen Positionsstopper an, womit der Verschiebevorgang gestartet werden kann.
- Die *Freigaben S1* und *S2* zeigen der Schweißsteuerung die erfolgreiche Positionierung neuer Batterien in der Prozessposition an. Mit *S1* wird der Deckelholvorgang vom Batteriekasten eingeleitet. Bei Verwendung eines Einlegers bleibt *S1* unabhängig von der Batteriepositionierung gesetzt, so dass dieser Vorgang nicht abhängig vom Shuttle ist. In jedem Fall ist die korrekte Batterieposition mit *Freigabe S2* erforderlich um den Schweißvorgang selbst zu starten.

Durch die Erzeugung von zumindest teilweise unabhängigen Abläufen statt einer gemeinsamen Schrittabfolge kann durch Parallelisierung der Abläufe bis zu einem gewissen Grad Taktzeit gewonnen werden. Das zeigt sich speziell bei Verwendung einer Deckeinlegevorrichtung, wo nur noch der Verschiebevorgang der Shuttlesteuerung und der eigentliche Schweißprozess die Taktzeit bilden, da alle anderen Vorgänge parallel dazu ablaufen.

Zur zusätzlichen Verkürzung der Umstellphase können Deckel und Spiegel gleichzeitig angehoben werden, da aufgrund der mechanischen Übersetzungen eine höhere Deckelgeschwindigkeit zur Kollisionsvermeidung sichergestellt ist. Nachteilig hat sich dabei aber erwiesen, dass eine zu geringe Relativbeschleunigung zwischen Heizplatte und Materialoberfläche beim Abheben die Neigung zum Fädenziehen des Kunststoffes erhöht. Bei gleichzeitigem statt sequentiellem Abheben ist aber genau das für den Deckel der Fall. Um in diesem Ablaufmodus den Effekt dennoch zu vermeiden, kann eine optimierte Einstellung der Oberflächentemperatur zielführend sein. Dazu sind aber weitere Erfahrungswerte notwendig, weshalb beide Abläufe für Vergleichstests eingebaut werden.

6.1.2 Positionierzeiten

Neben der Anpassung des Ablaufes kann die Achsbewegung selbst noch auf Zeitgewinn optimiert werden. Aufgrund der theoretischen Ausführungen im Kapitel 3 können für die gegebenen Achsdaten die benötigten Fahrzeiten ermittelt werden.

Die errechneten Verfahrszeiten der Servoachsen basieren auf dem jeweils maximalen Verfahrsweg, bei maximal möglicher Motordrehzahl und bei Achsbeschleunigungen von 3 m/s^2 und einer Ruckbegrenzung auf 100 m/s^3 . Mit diesen Dynamikwerten liegt die Mechanik unterhalb ihrer angegebenen Belastbarkeit, was sich positiv auf Verschleiß und Wärmeentwicklung aller beteiligten Komponenten auswirken wird.

Zur Untersuchung auf mögliche Zeiteinsparungen für eine Taktzeitverkürzung wurden die Dynamikwerte stark erhöht. Mit einer Veränderung auf 10 m/s^2 für die maximale Beschleunigung und 1000 m/s^3 für den maximalen Ruck sind damit teilweise die mechanischen und elektrischen Grenzen der Antriebe erreicht (Tabelle 6.1).

Achse	Positionierzeit berechnet [s]	max. mögliche Zeitersparnis [s]
Shuttle horizontal	1,43	0,39
Spiegel horizontal	1,04	0,27
Spiegel vertikal	0,50	0,14
Deckel vertikal	0,91	0,15

Tabelle 6.1: Mögliche Zeitersparnis durch maximale Achsbeschleunigung

Die tatsächlich erreichbare Taktzeitverkürzung hängt nun vom gesamten Zyklus ab. Je nach bearbeitetem Batterietyp wären damit unter Ausnützung aller Reserven zusammen etwa 1,6s zu gewinnen. Nicht berücksichtigt ist dabei allerdings, dass die Wahrscheinlichkeit für Manipulationsfehler damit steigen wird, beispielsweise durch Verlieren des Deckels aufgrund der erhöhten mechanischen Schwingneigung der beteiligten Komponenten.

Eine Taktzeitverkürzung auf diese Weise ist immer ein Kompromiss zwischen Zeitgewinn und erhöhtem Verschleiß des Antriebssystems. Wie stark nun tatsächlich an die Grenzen herangegangen sollte, hängt von den Taktzeiten der übrigen im Verbund arbeitenden Maschinen ab.

6.2 Spiegeltemperatur und Anschlussleistung

Neben der Optimierung auf kurze Taktzeit kann auch die Heizplattensteuerung ins Blickfeld gelenkt werden. Durch geeignete Maßnahmen sind sowohl die Grenzflächentemperatur der Aufsatzplatten des Heizelementes wie auch der Energieverbrauch der gesamten Anlage positiv beeinflussbar.

6.2.1 Temperaturverlauf

Durch die leistungslose Schaltbarkeit der Halbleiterrelais bietet sich eine Ansteuerung auf Basis eines pulsbreitenmodulierten Signals an. Damit kann eine einfache Leistungsbegrenzung erfolgen, mithilfe derer eine Verlaufsformung der zeitlichen Aufheizkurve erreichbar ist.

Bei geeigneter Ansteuerung kann so durch individuelle Schaltsignale auch eine Vorsteuerung für die einzelnen Heizstäbe realisiert werden, so dass die Heizleistung beliebig zwischen den Stäben aufgeteilt wird. Damit ist in gewissem Rahmen ein räumliches Temperaturprofil der Grundplatte erzeugbar, das damit zumindest Ungleichmäßigkeiten in der Oberflächentemperatur der Formplatten aufheben könnte. So eine Parametertabelle für Vorsteuerwerte wurde für jedes Heizelement vorgesehen.

Da bei Einzelbatterien die Ober- und Unterformen mittig montiert sind, kann es sinnvoll sein, die aussenliegenden Heizstäbe zur Schonung und Energieeinsparung abzuschalten, wenn die erzeugte Wärme hauptsächlich als Verlustwärme abgestrahlt wird. Durch geeignete Vorsteuerwerte kann genau das erreicht werden.

6.2.2 Energieverbrauch

Die Erzeugung von Prozesswärme beansprucht den Hauptanteil der elektrischen Energie aus dem Versorgungsnetz. Da zwei Heizelemente zu je 15kW vorhanden sind, die zumindest zeitweise gemeinsam auf Temperatur gehalten werden, wäre nahezu die doppelte Anschlussleistung der Maschine vorzusehen. Da die Anspeisungen der Heizstäbe gleichmäßig auf die Außenleiter des Hauptanschlusses aufgeteilt sind, ergäben sich selbst bei reduzierter mittlerer Leistung durch eine verringerte Pulsweite der Steuersignale kurzzeitig die Summenströme von 6 – 8 Heizstäben je Außenleiter.

Um diese Überdimensionierung an Leitungen und Absicherungen zu vermeiden, und dennoch keine Wartezeiten für das Aufheizen zu erhalten, kann eine optimierte Ansteuerung der Heizstäbe verwendet werden.

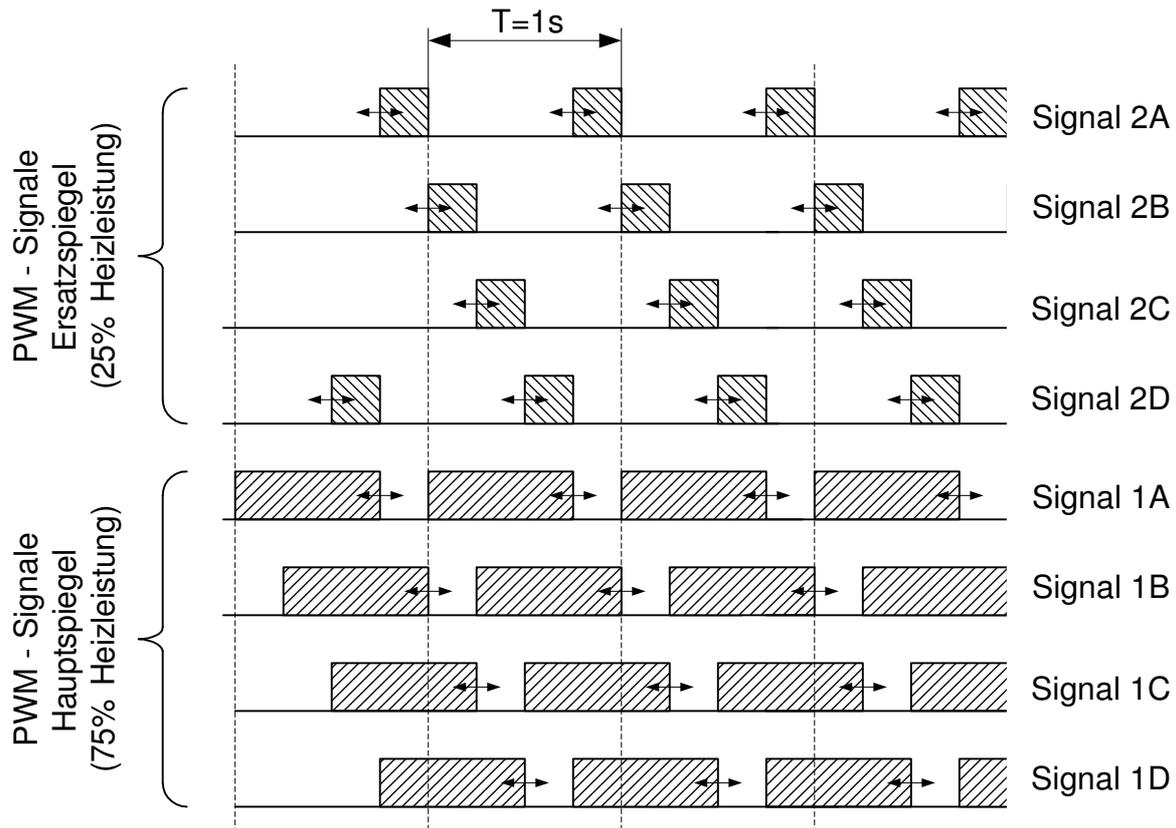


Bild 6.2: Grundkonzept der Steuersignalformung für beide Heizplatten

Als Lösungsansatz wurde die Methode gewählt, die Heizphasen durch zwei Steuersignale so ineinander zu verschachteln, dass die Gesamtleistung für beide Heizplatten die einer einzelnen nicht übersteigt, und dennoch beide Platten gleichzeitig in Betrieb gehen (Bild 6.2). Die Heizleistung steht damit für die in Bereitschaft stehende Platte nur dann zur Verfügung, wenn die im Einsatz befindliche nicht an Spannung gelegt ist.

Einen Schritt weiter geht die Aufteilung der beiden Signale in je 4 um $T/4$ versetzte Signale A-D, sodass zwar bei maximaler Steuerleistung von 100% bis $2 \cdot 50\%$ für die Außenleiter Spitzenströme von 3 - 4 Heizstäben fließen. Im aufgeheizten Zustand beider Platten allerdings, wenn die Steuerleistung durch Verringerung der Pulsweite reduziert wird, können die Summenströme trotz gleichzeitiger Beheizung auf den Spitzenstrom eines einzigen Heizstabes reduziert werden (Tabelle 6.1). Damit können einerseits die 20 - poligen flexiblen Versorgungsleitungen zu den Spiegeln schwächer dimensioniert und abgesichert werden, andererseits werden Netzrückwirkungen durch hohe Summenstrompakete verringert, was der Werksversorgung zugute kommen sollte.

	Außenleiter	Signal Hauptspiegel	Signal Ersatzspiegel
Stab 1	L1	1A	2A
Stab 2	L2	1B	2B
Stab 3	L3	1C	2C
Stab 4	L1	1D	2D
Stab 5	L2	1A	2A
Stab 6	L3	1B	2B
Stab 7	L1	1C	2C
Stab 8	L2	1D	2D
Stab 9	L3	1A	2A
Stab 10	L1	1B	2B

Tabelle 6.2: Zuordnung der Heizstäbe zu Außenleitern und versetzten Steuersignalen zur Minimierung der Außenleiter – Summenströme

6.3 Prozessqualität

Neben der korrekten Einstellung der Temperatur und den richtigen Positionierwegen haben auch die Verweilzeiten des Spiegels auf der Kunststoffoberfläche einen Einfluss auf die Qualität des Fügeergebnisses. Bei sequentieller Ansteuerung der beteiligten Achsen ergibt sich aufgrund des in dieser Konstruktion bewegten Spiegels neben dem Grundablauf ein weiterer möglicher Bewegungsablauf. Dabei wird nicht zuerst der Spiegel auf den Kasten abgesenkt, sondern der Deckel auf den Spiegel. Im Detail folgendermaßen:

- Vorschub des Spiegels wie oben.
- Absenken des Deckelnestes mit max. Geschwindigkeit bis auf Spiegelkontakt
- Öffnen der Deckelklemmung
- Gemeinsames Absenken von Deckel und Spiegel mit gleicher Geschwindigkeit bis auf Kastenkontakt
- Gleichzeitiges langsames Absenken von Deckel und Spiegel wie oben
- Wartezeit zum Durchwärmen wie oben

Für das Erwärmen des Materials wird sich damit noch kein großer Unterschied ergeben, da die Zeitunterschiede minimal sind. Wenn aber in beiden Ablauffolgen eine parametrierbare Wartezeit eingebaut wird, kann auf einfache Weise auf unterschiedliche Materialien oder Ausgangstemperaturen für Deckel und Kasten reagiert werden.

Das gleichzeitige Angleichen beider Oberflächen liefert nur dann lineare Bewegungsverläufe, wenn bei identer Angleichtiefe der Deckel mit doppelter Geschwindigkeit wie der Spie-

gel bewegt wird. Bei unterschiedlichen Wegen und Geschwindigkeiten ergeben sich nichtlineare Bewegungsverläufe bis hin zu stärkerem Angleichen für den Deckel als der Endposition entsprechen würde.

Das gleichzeitige Eintreffen am Ziel bei nicht sequentieller Achsansteuerung ist wie das kontrollierte Angleichen bei unterschiedlichen Angleichtiefen durch Verwendung der Technologiefunktionen der eingesetzten T-CPU lösbar. Im diesem Prototyp wurden beide sequentiellen Abläufe ohne Technologiefunktionen eingebaut, da für diese Maschine noch keine Erfahrungswerte für notwendige Angleichverläufe vorhanden sind.

6.4 Verschleiß

Als weitere Optimierungsmöglichkeit kann die Verminderung des Verschleißes der Maschine angesehen werden. Die wesentlichsten und kostspieligsten Angriffspunkte sind sicherlich die Servoachsen, wo der Verschleiß von Führungen und Spindeln aufwendige Reparaturmaßnahmen nach sich zieht. Ein schonender Betrieb ist sicherlich durch die Verringerung der Achsbeschleunigungen erreichbar, was aber nach oben erarbeiteter Berechnung in verlängerten Zykluszeiten resultiert. Damit ist eine Verlängerung der Lebensdauer bei dynamischer Fahrweise nur durch optimale Schmierintervalle erreichbar.

Eine einfache Maßnahme zum Verringern des Verschleißes ergibt sich an anderer Stelle.

Falls durch einen Bearbeitungsrückstand der nachfolgenden Maschine ein Stau auf der Rollbahn entsteht, und dadurch die fertigen Produkte nicht mehr abtransportiert werden, wird grundsätzlich die Shuttlefunktion gestoppt, um eine Beschädigung von Greifern oder Batterien zu verhindern.

Nachdem die Batterietransport durch friktionsgekoppelte Rollen stattfindet, ergibt sich bei längerer Stausituation einen erhöhten Verschleiß der Rollbahn. Aus diesem Grund werden nach einem fünfminütigem Zustand in dieser Situation die Rollbahnen von Einlauf und Auslauf abgeschaltet. Wenn der Stausensor, der sich außerhalb der Auslaufrollbahn befindet, wieder eine freie Bahn meldet, schalten sich die Rollbahnen wieder selbsttätig ein, und der Produktionsbetrieb wird fortgesetzt.

6.5 Bedienkomfort

Ein nicht unwesentlicher weiterer Aspekt für Optimierungen ist neben den ablauf- und maschinentechnischen Details die Anpassung der Benutzerfreundlichkeit der Maschine. Durch geeignete Maßnahmen können Arbeitsschritte vereinfacht und übersichtlicher gestaltet werden, wenn geeignete Hilfsfunktionen eingebaut und Schnittstellenanpassungen durchgeführt werden.

6.5.1 Hilfsfunktionen

Eine Gruppe von Hilfsfunktionen erleichtert die Manipulation der Batterien in Sonderzuständen der Maschine. Da für einen Neustart des Produktionsprozesses nach einem Abbruch des Automatikbetriebes durch Fehler oder Typenwechsel sich die Maschine in leerem Zustand befinden soll, können Abläufe dafür eingebaut werden

Zyklusstop

Wenn die Funktion Zyklusstop aktiviert wurde, führt die Maschine den begonnenen Schweißvorgang normal zu Ende, stoppt aber die Einlauf- und Shuttlefunktion der Batterie-transporteinrichtung. Damit wird auch der letzte Schweißprozess in korrekter Weise durchgeführt, und die Maschine befindet sich im Stop – Zustand.

Damit entfällt das Risiko für den Bediener, durch frühzeitigen Abbruch fehlerhafte Verschweißungen zu produzieren, oder andererseits die Aufgabe, auf Freiwerden des Einlaufes zu warten.

Leerfahrt

Im Wesentlichen wird durch Betätigen der Leerfahrt-Taste ein Zyklusdurchlauf der Shuttlesteuerung aktiviert und damit die in der Maschine befindlichen Batterien ausgeschoben. Dieser Zustand kann einerseits nach einem Zyklusstop oder dem Ende der Produktion der vorhergehenden Maschine eintreten, ebenso aber nach Auftreten eines Fehlerzustandes und notwendigem Eingriff durch Betreten der Maschine. Da jedoch ein Verschiebevorgang nicht mit Batterien in undefinierter Position möglich ist, sind erst einige kontrollierende Vorarbeiten notwendig. Speziell beim einem Wiedereinschalten der Maschine nach einem Versorgungsausfall werden sich Situationen mit undefinierter Batterieposition finden, und ein Einklinken bei inkorrekt positionierten Kästen kann zu Verklemmungen führen, die nur durch manuelle Eingriffe nach Betreten der Schutzhäuser der Maschine behebbar sind.

Der Ablauf der automatischen Vorarbeiten für eine Leerfahrt:

- Prüfen auf ausgefahrenen Blattstopper der Vereinzelung. Falls das der Fall ist, oder falls die Lichtschranke frei ist, sodass der Blattstopper gesetzt werden kann, wird keine weitere Batterie aus der Vereinzelung kommen.
- Prüfen auf Batterien bei den Haltestoppern und die Stopperposition selbst. Falls der rechte ausgefahren werden kann, und falls bei Ansprechen der rechten Reflexschranke auch der linke Haltestopper ausgefahren werden kann, wurden keine Kästen mit den Stoppnern auf Zwischenpositionen eingeklemmt.
- Wenn nun die Rollbahn des Einlaufs für einige Sekunden eingeschaltet wird, müssen alle möglichen Batterien in Position stehen. Der Einklinkvorgang kann ausgeführt werden.

Bei unplausiblen Stellungen der Haltestopper sind die Batterien bereits zu weit gerollt worden und müssen vor dem Verschieben von Hand positioniert werden.

Alle in der Maschine befindlichen Batteriekästen können anschließend über die Leerfahrt - Taste ausgeräumt werden.

Durchlaufbetrieb

In diesem Betriebszustand erfolgt nur ein Transport der Batterien durch die Maschine ohne einen Schweißvorgang durchzuführen.

Der Sinn dieser Sonderfunktion liegt darin begründet, dass die Maschine keine durchgängige Rollbahn hat, und somit die Shuttlefunktion für die Überbrückung dafür benötigt wird, was wiederum die Vereinzelung und genaue Positionierung der Batteriekästen voraussetzt. Die Möglichkeit, den Schweißvorgang auszulassen, ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn dieser Vorgang vorübergehend von einer in Serie aufgestellten weiteren Maschine durchgeführt wird, wie es am Aufstellungsort der Fall ist. Als Abhilfe müssten die Batterien manuell durch die Maschine geschoben, oder außen herum getragen werden.

Für ein Service der Servoantriebe ist diese Funktion nicht geeignet, da aufgrund der Verwendung des Shuttles sich auch alle anderen Servoachsen im aktiven, freigeschalteten Zustand befinden müssen.

6.5.2 Prozesswerteingabe

Eine weitere Hilfsfunktion erleichtert die Eingabe von Prozesswerten für den Automatikbetrieb.

Zur Parametrierung eines neuen Batterietyps sind neben Prozesstemperatur, Verfahrensgeschwindigkeiten, Prozesszeiten und Ablaufstrategien wie Doppelbearbeitung bei kleinen Batterietypen eine Vielzahl von Positionsangaben für alle Achsen festzulegen. Da speziell die beiden Vertikalachsen unterschiedliche Bezugspunkte haben, kann dies durch die bei dieser Maschine veränderbare Ablaufreihenfolge für den Schweißprozess zu einer unerwünschten Rechenaufgabe für den Bediener werden, wenn es zu kleinen Anpassungen der eingestellten Positionen kommen soll oder besonders, wenn Veränderungen an der Mechanik stattfinden, wie der Einbau einer dickeren Heizform oder eines niedrigeren Deckelnestes. Folgende Achspositionen werden neben zusätzlichen Servicepositionen während des Schweißprozesses von der vertikalen Spiegelpositionierung angefahren (Bild 6.3):

- S1_Y: Höhe während des Spiegelvorschubes für den optimalen Sicherheitsabstand zwischen Deckelnest und Batteriepolen.
- S2_Y: Erste Kontaktposition von Spiegel und Kasten
- S2_Z: Tiefste Position des Spiegels im Prozess bei abgeschmolzener Kastenoberfläche

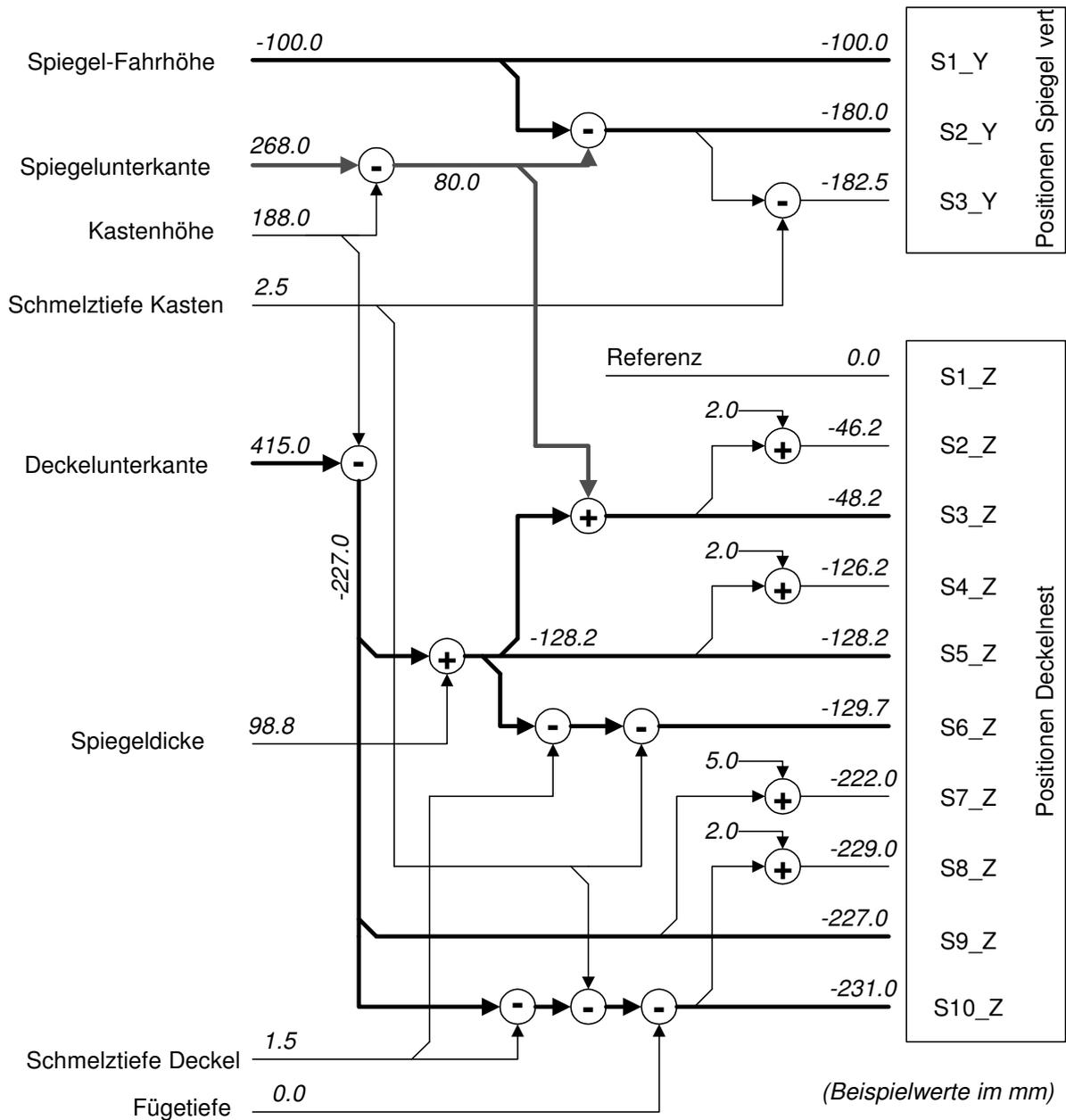


Bild 6.3: Umrechnung von Positionen aus der Produktperspektive auf Achspositionen

Zusätzlich anfahrbare Positionen sind für den Spiegelwechsel und die Referenzfahrt vorgesehen.

Durch die größere Anzahl der Prozessschritte des Deckelnestes und die Abhängigkeit von der Spiegelposition ergeben sich wesentlich mehr Prozesspositionen für diese Achse:

- S1_Z: Referenzposition und Rückzugshöhe des Deckelnestes
- S2_Z: Vorposition des Deckels vor Spiegelkontakt in oberer Stellung. Dient zum rechtzeitigen Öffnen der Halteklammern.

- S3_Z: Deckel in Spiegelkontakt in oberer Stellung, Erwärmen des Deckels vor dem Kasten.
- S4_Z: Vorposition des Deckels vor Spiegelkontakt in unterer Stellung.
- S5_Z: Deckel in Spiegelkontakt in unterer Stellung, der Kasten wurde bereits vorgewärmt
- S6_Z: Endposition nach dem Abschmelzen des Deckels
- S7_Z: Anhubhöhe des Deckels bei Aufnahme vom Kasten
- S8_Z: Klammeröffnung vor dem Fügen des Deckels
- S9_Z: Holposition des Deckels vom Kasten
- S10_Z: Tiefste Deckelposition auf Endmaß der Batterie

Ein Großteil dieser Positionen ist voneinander abhängig. Zum Auflösen dieser Abhängigkeit ist eine Änderung der Perspektive vonnöten. Diese aus insgesamt 13 aus Maschinensicht notwendigen Positionen können aus der Ansicht in einer Produktperspektive in 5 Maschinen- bzw. Produktabmessungen und 3 Prozessabmessungen umgerechnet werden:

- Spiegel – Fahrhöhe: wie vorhin
- Spiegelunterkante: Leicht messbare Differenz zwischen Bearbeitungsgrundfläche und tiefstem Punkt des vorne positionierten Spiegels. Stellt somit einen Bezug der Spiegelpositionierachse zur Grundplatte her, und inkludiert die Dicke der unteren Heizform
- Spiegeldicke: Gesamtabmaß beider Heizformoberflächen, ist somit die fehlende Differenz bei eingefahrenem Spiegel.
- Deckelunterkante: Höchster Punkt der Deckelkontaktfläche gegenüber der Bearbeitungsgrundfläche. Stellt somit einen Bezug des Deckels zur Grundplatte her und inkludiert die Dicke des Deckelnestes samt formabhängiger Lage des Deckels im Nest.
- Schmelztiefe Kasten: Prozessparameter der den Angleichweg des Kastens bestimmt
- Schmelztiefe Deckel: Prozessparameter für den Angleichweg des Deckels
- Fügetiefe: Zusätzlicher Weg nach Kontakt beider Schmelzflächen, mit dem erweichtes Material verdrängt wird.

Durch diese Transformation (Bild 6.3) können die einzugebenden Parameter verringert und voneinander entkoppelt werden. Eine Änderung eines Prozessparameters ist so jederzeit möglich und ergibt so eine automatische Änderung von bis zu 4 Positionen.

Die einfache Anpassung der Kastenhöhe zieht mit 11 Positionsänderungen eine Aktualisierung fast aller vertikalen Achspositionen nach sich.

Selbstverständlich ist mit dieser Methode eine andere Denkweise für den Bediener gefordert, da eine Änderung einer einzelnen Position aus der Maschinensicht nun nicht mehr so einfach möglich ist.

Achssteuerung

Um die tatsächlich im Prozess angefahrenen Positionen überprüfen zu können, ist im Handbetrieb neben der Tippfunktion ein Positionierbetrieb zur Achssteuerung implementiert. Dabei werden durch die Steuertasten fixe Positionen angefahren, und zwar genau die, die aus dem eingestellten Batteriedatensatz auch im Prozess verwendet werden. Damit lassen sich zwei der Achsen im Prinzip wie Pneumatikzylinder steuern, sie werden von einer festgelegten Endlage in die andere Endlage bewegt, die allerdings parametrierbar ist.

Die zwei restlichen Achsen haben im Prozess mehrere Positionen anzufahren, diese stehen auch hier zur Verfügung. Durch Weitertippen lassen sich die Positionen der Entfernung nach mit den im Prozess eingestellten Geschwindigkeiten anfahren, so dass damit im Prinzip eine manuelle Verschleißung möglich sein sollte. Die richtigen Prozesszeiten werden so natürlich nicht eingehalten werden können.

6.5.3 Optimierung der Navigationsmenüstruktur

Neben den Hilfsfunktionen für den Benutzer kann durch Veränderungen des allgemeinen Erscheinungsbildes der grafischen Schnittstelle eine weitgehende Optimierung erzielt werden. Alleine durch einen vereinfachten und übersichtlicheren Aufbau kann Einarbeitungszeit gespart werden.

Grundsätzlich beginnt nach einem Initialisierungsvorgang der Maschine das Grafikterminal mit der Anzeige eines Grundbildes. In diesem wird eine Visualisierung des überwachten Prozesses *V0* im Überblick dargestellt sein, und über Navigationstasten *N0* wird in Hauptfunktionen zum Einstellen und Überwachen des Prozesses gewechselt. Anhand eines Beispiels (Bild 6.4) soll hier die Navigation in den Menüs untersucht werden.

Die angenommene Aufgabe für einen Einsteller soll sein den in Position stehenden Batteriekasten zu klemmen, und danach durch langsames Absenken des bereits vorne positionierten Spiegels die korrekte Aufsetzposition zu finden.

Bildfläche 1 sei ein Hauptbild zum Steuern der Servoachsen, Bildfläche 1.1 das untergeordnete Bild für die entsprechende Achse mit Funktionen für programmierte Positionen, und in Bildfläche 1.1.1 sei die Sonderfunktion Achstippen zum gefühlvollen kontinuierlichen Absenken der Achse.

Daneben sei Bildfläche 2 das Hauptbild zum Steuern der Pneumatik, und in Bildfläche 2.2 die Unterfunktionen zum Öffnen und Schließen der Klemmzylinder angeordnet.

Die sich ergebende umgekehrt baumförmige Struktur des Menüaufbaus erfordert nach Betätigen der angenommenen Funktion *F2.2a* in der Bildfläche 2.2 zum Klemmen des Batteriekastens eine Abfolge der Navigationsmenüs von *N2.2* -> *N2* -> *N0* -> *N1* -> *N1.1* -> *N1.1.1* um von der Pneumatikfunktion in die Positionierfunktion *F1.1.1* zu gelangen, zusammen also 5 Menüwechsel, bevor die gewünschte Funktion bedient werden kann.

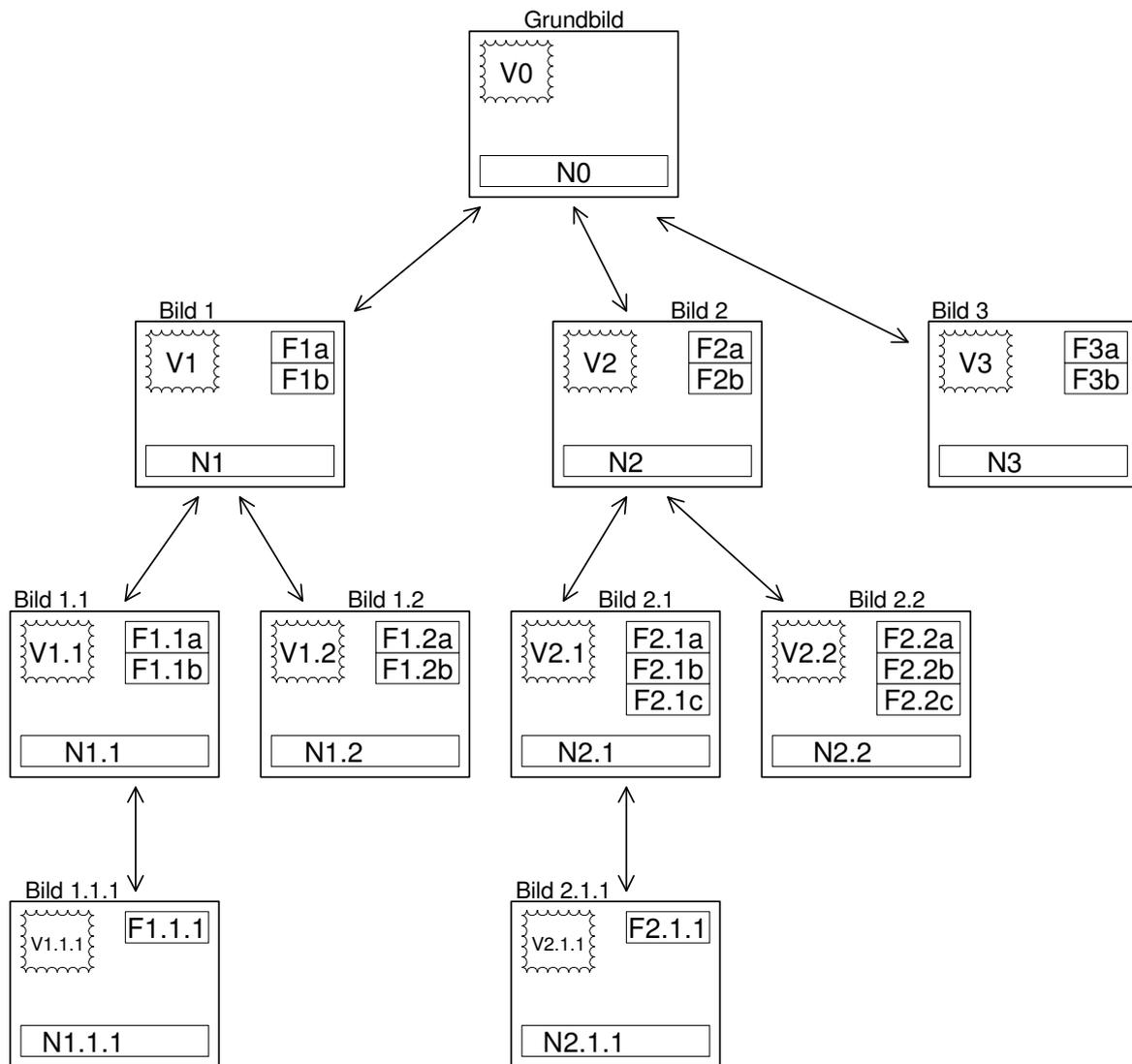


Bild 6.4: Klassischer baumförmiger Aufbau eines Bedienmenüs

Bei komplexeren Menüstrukturen und tiefer geschachtelten Ebenen besteht zudem die Gefahr für den Bediener die Übersicht zu verlieren wo die gewünschte Funktion zu finden ist, da aufgrund der beschränkten Bildfläche kaum so wie bei PC - Betriebssystemen eine überblickbare Baumansicht zusätzlich dargestellt werden kann. Exakt dasselbe Problem ergibt sich zum heutigen Zeitpunkt für Mobiltelefone mit kleinem Display.

Eine Hilfestellung bietet die sichtbare Nummernvergabe für die vorhandenen Panelbilder im Sinne der Baumstruktur wie im Beispiel, um zumindest aus jedem Bild die zugehörige Hauptgruppe und die Ebene erkennen zu können.

Ein anderer Ansatz ist das Zufügen einer Navigationstaste für jede Bildfläche zum direkten Springen in das Grundbild, um die notwendigen Bedienschritte abzukürzen. Das obige Beispiel verkürzt sich so mit einer Menüabfolge von $N2.2 \rightarrow N0 \rightarrow N1 \rightarrow N1.1 \rightarrow N1.1.1$ auf 4 Menüwechsel.

Als Vorteil der Baumstruktur ergibt sich die einfache Erweiterbarkeit um Menüpunkte, wie es während der Entwicklungsarbeit durch Zufügen und Umgruppieren von Funktionen erfolgt.

Modifizierte Menüstruktur

Ab einer bestimmten Bildfläche kann für grafikfähige und berührungssensitive Displays eine weitere Möglichkeit gefunden werden, wenn die vorhandene Menüstruktur umgebaut wird. Dabei wird einerseits der Baum um das Grundbild gekürzt und die Hauptfunktionen auf gleichberechtigte Grundbilder umgebaut, andererseits wird für jedes Bild ein gleichartiges Navigationsmenü zugefügt, das einen schnellen Wechsel in die Hauptfunktionsbilder ermöglicht (Bild 6.5).

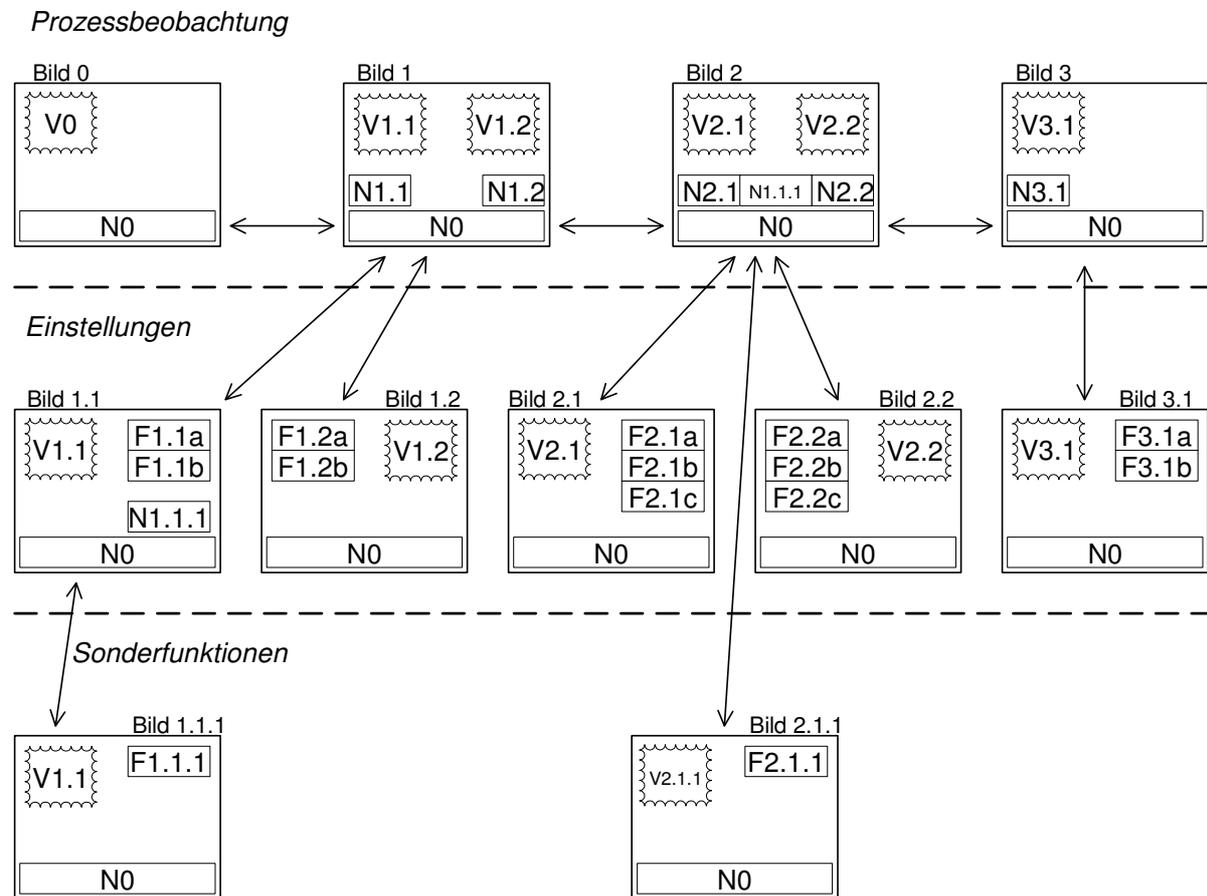


Bild 6.5: Modifizierte Menüstruktur zur Minimierung der Bedienschritte

Das bei den vorangehenden Betrachtungen verwendete Beispiel verkürzt sich so ausgehend vom vergleichbaren Panelbild 2.2 mit der Pneumatikfunktion $F2.2a$ auf eine Navigation über die Menüs $N0(1) \rightarrow N1.1 \rightarrow N1.1.1$ auf 3 Menüwechsel zum Erreichen der Positionierfunktion $F1.1.1$ für die gewünschte Achse. Bei Umkehren der Richtung für die gestellte Aufgabe sind damit sogar 2 Menüwechsel ausreichend.

Selbstverständlich wird der Vorteil der Einsparung von Navigationsschritten durch einen erhöhten Platzbedarf erkaufte. Da jedoch der Neuigkeitswert einer Information gering ist, wenn sie in jedem Bild an der selben Stelle angezeigt wird, kann dieses Navigationsmenü schlicht gehalten und so weit wie möglich an den Bildschirmrand verlagert werden, um Platz für andere Informationen und zusätzlich notwendige Navigationstasten zu schaffen.

Ebenenstrukturierung

Hilfreich zur Wahrung der Übersichtlichkeit kann neben der vertikalen Einteilung in Prozessfunktionalität eine horizontale Gliederung in die Bedienfunktionalität sein.

Die oberste Ebene dient dabei im Wesentlichen der Visualisierung des Maschinenzustandes. In diesem Bereich sollten alle prozessrelevanten Parameter und Zustände zu finden sein, ohne zu tief in die Menüstruktur absteigen zu müssen. Wenn außerdem darauf geachtet wird, dass sich in dieser Ebene keine schaltbaren Funktionen befinden, die eine ungünstige Auswirkung auf den laufenden Prozess haben könnten, ist ein problemloses Blättern in den Panelbildern dieser Ebene im laufenden Betrieb möglich.

Über Navigationstasten der ersten Ebene kann in die zweite Ebene gewechselt werden, in der sich die für den Bediener befindlichen Schalt- und Steuerfunktionen befinden. Falls die Bedienung nicht während des Betriebes erlaubt sein sollte, kann diese Navigationstaste in Abhängigkeit vom Betriebszustand gesperrt werden. Beispielsweise wird eine fliegende Änderung von Zielpositionen während des Schweißvorganges nicht sinnvoll sein, da eine Fehleingabe nicht ausgeschlossen werden kann.

Eine dritte Ebene stellen die Bilder mit Sonderfunktionen dar, die nicht zur Einstellung für den Benutzer gedacht sind. Da eine Änderung mancher Werte eine genauere Kenntnis von Zusammenhängen in der Maschine erfordern kann, besteht die Möglichkeit solche Funktionen mit Kennwörtern zu sperren, die nur für Einsteller oder Servicefachleute zugänglich sind. Die Navigationstasten dafür können sich sowohl in der Einstellungsebene als auch in der obersten Ebene befinden.

Da sich durch eine konsequente Strukturierung in solcher Weise die Verschachtelungstiefen für die meisten Funktionen auf natürliche Weise begrenzen, kann für den Benutzer leichter der Überblick über die Menüstruktur behalten werden.

Symbolanordnung

Aus der Ebenenaufteilung ergibt sich eine weitere Eigenschaft. Da das Ziel ist, die Visualisierung der Hauptfunktion schon möglichst vollständig in der ersten Ebene darzustellen, kann bei geeigneter Anordnung in der untergeordneten Teilfunktion durch Austausch des nicht entsprechenden Teils der Visualisierung durch die zugehörigen Funktionen ein gleichartiges Teilbild erzeugt werden.

Im obigen Beispiel (Bild 6.5) unterscheidet sich dadurch das Panelbild 1 von den untergeordneten Teilfunktionsbildern 1.1 und 1.2 abgesehen von Navigationstasten nur durch den

Ersatz der Teilbereiche der Visualisierung V1.1 bzw. V1.2 durch die Bedienbereiche der Funktion F1.2 bzw. F1.1.

Bei günstiger Anordnung kann damit wieder die Übersichtlichkeit durch redundante Bereiche erhöht werden, was aber ebenso eine ausreichende Bildfläche und eine kompakte Symbolik erforderlich macht.

Als zusätzliches Ziel kann eine deutliche Trennung oder Kennzeichnung der Navigationstasten von den Funktionstasten gelten um eine irrtümliche Bedienung von Funktionen zu vermeiden.

6.5.4 Optimierung des Bildaufbaus

Den Überlegungen vorangehenden Abschnittes folgend wurde ein systematisch aufgebautes Bildkonzept entworfen. Allen Bildern gemeinsam ist eine Fußzeile, die die Hauptnavigation für die unterste Ebene enthält.

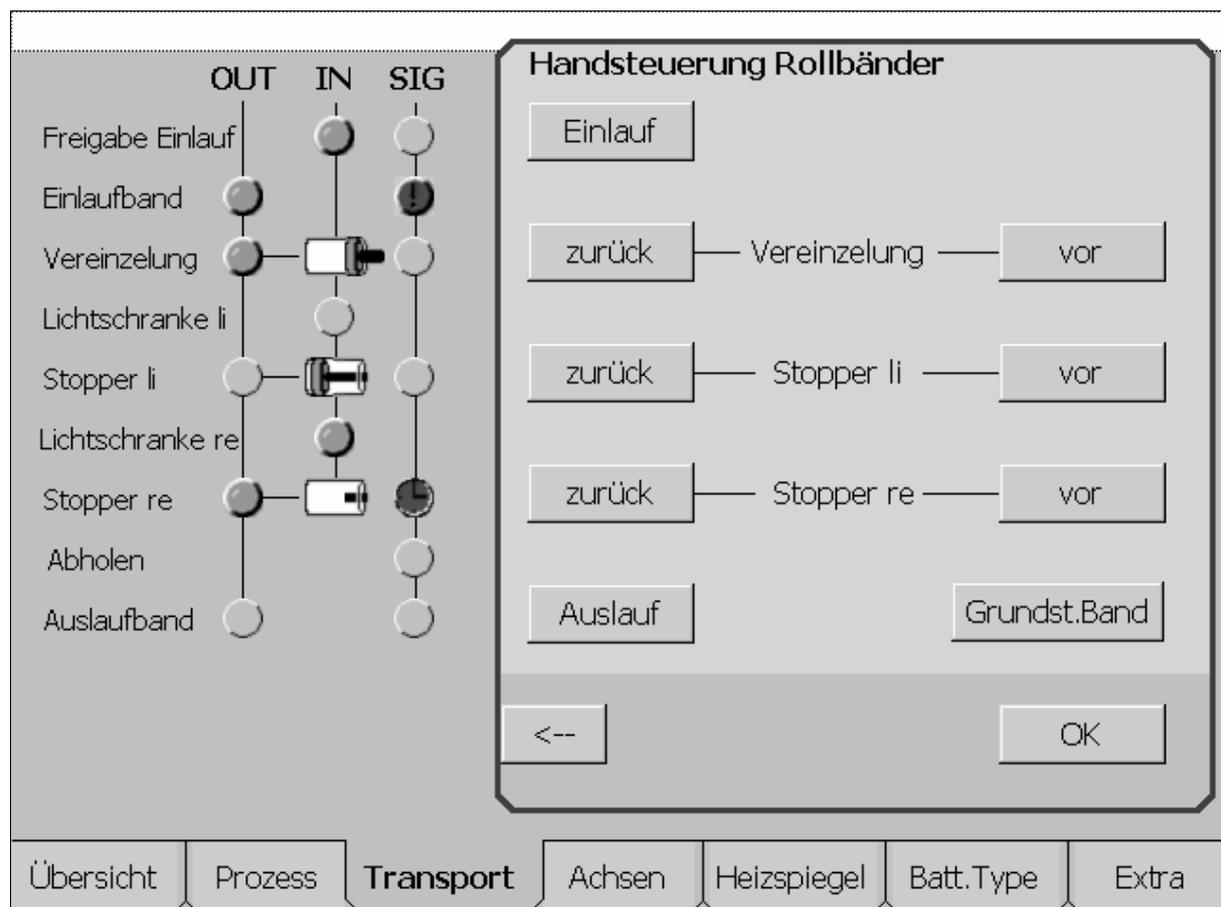


Bild 6.6: Beispielhaftes Bild zur Handbedienung der Maschine

Navigationsleiste

Da diese Navigationsleiste bedienbar bleiben soll, kann nur eine begrenzte Anzahl von Menüpunkten untergebracht werden, da die Trefferwahrscheinlichkeit für einen angestrebten Menüpunkt mit der Breitenabnahme der einzelnen Felder ebenfalls sinkt.

Als Anzahl wurden somit 7 Einträge festgelegt, die aus jeder Situation angewählt werden können (Bild 6.6)

Als Form der Navigationstasten wurden keine Standardtasten gewählt, sondern eine einer Karteidarstellung von modernen grafischen Betriebssystemoberflächen nachempfundene Liniengrafik. Damit kann eine deutliche Kennzeichnung des ausgewählten Menüpunktes auf intuitive Weise erreicht werden, ohne eine Bildüberschrift verwenden zu müssen.

Folgende Menüpunkte finden sich in der Navigationsleiste:

- Übersicht – ist das Bild das nach dem Start der Maschine angewählt wird. Darin werden alle grundlegenden Maschinendaten und Betriebszustände angezeigt. Als Einzelsymbol sind dort ebenso die Zustände der einzelnen Hauptfunktionen zusammengefasst.
- Prozess – fasst alle für den Schweißprozess relevanten Einstellungen zusammen.
- Transport – bietet die Funktionen der Bandsteuerung, der Shuttlesteuerung und des Deckelzufuhrablaufes.
- Achsen – bietet einen Überblick über die Zustände aller vier Servoachsen
- Heizspiegel – zeigt die Zustände und Einstellmöglichkeiten der Temperatursteuerung für beide Spiegel.
- Batterietype – bietet eine Benutzerführung zum Laden und rückspeichern der Batteriedatensätze
- Extra – beinhaltet alle Sonderfunktionen, die hauptsächlich für den Servicebetrieb benötigt werden. ausgeführt werden.

Kopfzeile

Als weiteres Bildelement, das in allen Bildern vorkommt, ist eine Kopfzeile, in der alle anstehenden Meldungen im Klartext ausgegeben werden. Bei auftretenden Einzelereignissen gibt es damit für jedes Bild eine rasche Möglichkeit, auf die Fehlerursache zu reagieren, ohne in ein Diagnosebild wechseln zu müssen.

Bei Auftreten von Mehrfachfehlern wird allerdings nur die letzte anstehende Meldung angezeigt, die beispielsweise ein Folgefehler sein kann, der kein gezieltes Schließen auf eine tatsächliche Fehlerquelle ermöglichen würde.

Genau dafür wurden für das Übersichtsbild Symbole für Sammelmeldungen geschaffen, die schneller durch Anzeige der betreffenden Funktionsgruppe eine Ortung erlauben. Durch Wechseln in die betreffende Hauptgruppe sollte der Fehler aus der Symbolik erkennbar werden.

Als weitere Möglichkeit besteht noch ein Wechseln in das Diagnosearchiv, wo alle anstehenden im Klartext aufgelistet werden. Und letztendlich sind im Meldearchiv alle aufgetretenen Meldungen nach Zeitstempel sortiert abzurufen, was aber durch das Auslesen des umfangreichen Datensatzes oft minutenlange Wartezeiten für den Bildaufbau bedeuten kann.

Visualisierung der Teilabläufe

Für jeden der Teilprozesse wurde eine Visualisierung, somit eine vereinfachte bildliche Darstellung des komplexeren Ablaufes in das entsprechende Teilbild eingebaut. Damit soll es möglich sein sich auf schnelle Weise einen Überblick über den ablaufenden Vorgang zu verschaffen (Bild 6.6 links).

Es wurde versucht, auch die räumlichen Verhältnisse der entsprechend beteiligten Informationen in der Grafik zu berücksichtigen. Somit gibt beispielsweise die Anordnung der an der Rollbahnsteuerung beteiligten Sensorik in der Grafik im Wesentlichen auch die räumliche Aufteilung wieder.

Falls in ein Untermenü gewechselt wird, ist in den meisten Fällen die entsprechende Grafik weiterhin sichtbar, wodurch die Auswirkungen eventueller Bedienvorgänge direkt symbolisch rückgemeldet werden. Damit ist es aber auch notwendig, den Visualisierungsbereich kompakt zu halten und nur die wichtigen Informationen darzustellen, um nicht die Übersichtlichkeit auf dem geringen zur Verfügung stehenden Raum zu gefährden.

Fenstertechnik

Für die Erstellung einer Grafischen Bedien- und Anzeigefläche ist für diese Art von Terminal und mit dieser Projektierungssoftware die Verwendung von Einzelbildern vorgesehen. Bei geeigneter Anordnung von Bildelementen ist damit trotzdem die Illusion einer Fensterprogrammierung erzeugbar.

Wenn also ein auftauchendes Fenster vor einem bestehenden Hintergrund dargestellt werden soll, sind grundsätzlich zwei vollflächige und getrennte Einzelbilder erforderlich, die über Navigationstasten angesprungen werden.

Wenn nun das zweite Bild eine Kopie des ersten darstellt, worin ein Teil der Bildinformation durch ein Fenster ersetzt wird, wurde zwar redundante Information erzeugt, die auch gespeichert werden muss, dafür kann so die Übersichtlichkeit deutlich erhöht werden. Allerdings ist der zur Verfügung stehende Ausgabebereich im zweiten Bild somit eingeschränkt, was aber in der Natur der Fenstertechnik liegt.

Das so entstandene simulierte Fenster ist natürlich nicht verschiebbar, da es sich um kein logisches eigenständiges Element handelt, sondern um eine reine Grafikinformati- on, unter der keine anderen Elemente versteckt sind.

In diesem Projekt wird hauptsächlich mit solchen Fenstern gearbeitet. Neben den 7 reinen Grundbildern ist ein wesentlicher Teil der Bedienfunktionalität in 18 unterlagerten Fenstern in maximal zwei darunterliegenden Ebenen verpackt.

Die Anordnung der Informationen in diesen Fenstern wurde konsequenterweise wieder so gewählt, dass sich im unteren Teil die Navigationstasten befinden, und durch Farbgebung des Hintergrundes räumlich und optisch getrennt davon die Steuerungstasten zum Beeinflussen der Maschine. Somit ist ein intuitives Blättern in allen Unterfunktionen ohne unbeabsichtigtes Betätigen einer Funktion problemlos möglich.

Durch diese Systematik sind auch leicht Navigationsknöpfe in Abhängigkeit vom Betriebszustand sperrbar, sodass beispielsweise eine Handbedienung im Automatikbetrieb von vornherein ausgeschlossen werden kann.

6.5.5 Bildsymbole

Für eine kompakte Visualisierung der Prozesse in beschränkten Darstellungsflächen ist eine dafür optimierte Symbolik erforderlich. Als Haupteigenschaft ist dabei der Platzverbrauch im Verhältnis zur Aussagekraft maßgeblich. Aufgrund der Einfachheit und der universellen Verwendbarkeit wurden vielerorts Symbole verwendet, die Lämpchen nachempfunden sind.

Bit - Symbole

Viele anzuzeigende Signale stellen eine Binärinformation dar, die sich mit

- Grünes Symbol für EIN / OK
- Rotes Symbol für Fehler / Warnung
- Neutrales Symbol für AUS

darstellen lassen. Damit lässt sich ein großer Teil der interessanten Zustände wirkungsvoll darstellen (Bild 6.7).

Wenn man allerdings die Tatsache berücksichtigt, dass nahezu 10% der männlichen Bevölkerung zu einem unterschiedlichen Grad von Farbsehschwäche betroffen ist [Bar95], wird eine verbesserte Wahrnehmbarkeit dadurch erzielt, dass man das entsprechende Symbol neben einem Farbinhalt zusätzlich durch einen Informationsgehalt im Graubereich erweitert.

Als Nebeneffekt ist es damit möglich die Visualisierung notfalls in einer Graustufenumgebung darzustellen. So sei beispielsweise an eine gedruckte Bedienungsanleitung gedacht, was in etwa den Bildern in dieser Arbeit entsprechen würde.

Hier wurde durch Einbau eines 3-D Effektes der Zustand zwischen aktiv und passiv hervorgehoben, und bei Auftreten eines Fehlers ein entsprechendes Warnzeichen zusätzlich eingebaut.

Symbol	Farbe	Bedeutung
	grün	Ein, OK
	grau	Aus, neutral, ohne Meldung
	rot	Fehler, Warnung
	rot	Zeitüberlauf
	gelb	Handbetrieb
	gelb	Achse bewegt sich links / rechts
	gelb	Achse bewegt sich ab / auf
	weiß/grün	Zylinder ausgefahren
	grün/weiß	Zylinder eingezogen
	weiß	Zwischenposition oder Sensorfehler

Bild 6.7: Miniatursymbole zur Visualisierung von Bitmeldungen

Durch die Unterscheidung eines weiteren Fehlerfalles durch Zeitüberlauf in bestimmten Situationen findet ein zusätzliches Uhrensymbol Anwendung, und für die Anzeige von Achsbewegungen bei minimalen Geschwindigkeiten wurden aktive Symbole mit Richtungsanzeige entworfen.

Für einige Anwendungsfälle ergibt sich das Problem, dass zwei Bitmeldungen zusammengefasst eine wesentlich höhere Aussagekraft hätten, wie es beispielsweise bei Reedsensoren in Pneumatikzylindern der Fall ist. Dort hilft dem schnellen Zuordnen der Bitmeldung zum tatsächlichen mechanischen Zustand, wenn die beiden Endlagensignale zu einer Grafik zusammengefasst werden, die einen gemeinsamen Zustand anzeigt. Hier wurde das durch Nebeneinanderlegen zweier Symbole erreicht, die zusammen ein animiertes Zylindersymbol ergeben. Während des erlaubten Zwischenzustandes wird damit ein undefinierter Zustand angezeigt, der allerdings nach einiger Zeit in einem Zeitüberlaufsfehler resultiert.

Wert - Symbole

Eine andere Type von anzuzeigenden Symbolen repräsentiert einen Zahlenwert, wie beispielsweise die Position einer Achse oder eine Temperaturanzeige.

Hier haben numerische Anzeigen den Vorteil, den exakten Wert anzeigen zu können, der Bezug zu den Grenzen ist aber nicht ersichtlich. Grafische Balkenanzeigen oder Rundskalen stellen den Zusammenhang von Momentanzustand, Änderungsrate und Endwerten wesentlich besser dar, dafür fehlen ihnen das Auflösungsvermögen und die Möglichkeit zum exakten Einstellen. Es ist somit oft von Vorteil beide Anzeigarten zu kombinieren.

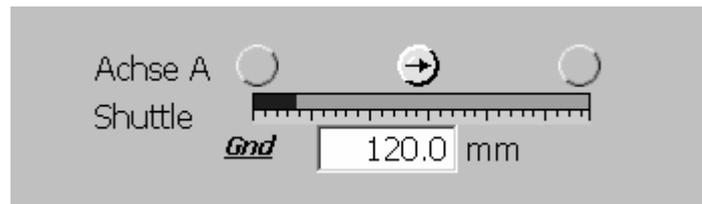


Bild 6.8: Visualisierung des Bewegungszustandes einer Servoachse

Eine Servoachse kann im Gegensatz zu einer Temperaturanzeige sehr rasche Zustandsänderungen durchführen, die unter der Aktualisierungsrate der Visualisierung von hier 1s liegen, andererseits können sehr geringe Geschwindigkeiten verfahren werden, die durch eine herkömmliche Balkenanzeige nicht adäquat aufgelöst werden können.

Deshalb wurde der Achszustand in diesem Projekt zu einer Symbolgruppe zusammengefasst, die neben Balkenanzeige und numerisches Feld die Bitmeldungen für Erreichen der Zielposition sowie eine Bitanzeige für die Richtung einer momentan durchgeführten Bewegung enthält (Bild 4.5).

Für Achsen mit mehreren im Prozess anzufahrenden Positionen wurde ein zusätzliches Feld eingefügt das die Nummer der anzufahrenden Position anzeigt. Mit dieser Konstellation können die wichtigsten Achszustände aller vier Servoachsen problemlos und übersichtlich in einem einzigen Bild präsentiert werden.

6.6 Umrüst-, Service- und Inbetriebnahmezeiten

Neben der Unterstützung für den Bediener der Maschine kann zur Erleichterung von Service- und Einstellarbeiten optimiert werden. Neben der Darstellung aller verwendeten Eingänge und Ausgänge der Steuerung in übersichtlicher Form ist die Klartextausgabe von bekannten Fehlern sowohl in der Kopfzeile wie auch in einer Fehlerhistorie zur raschen Fehlerbehebung hilfreich. Eine weitergehende Servicefunktion unterstützt das Wechseln des Deckelnestes.

Deckelnest wechseln

Diese einfache Funktion senkt im Handbetrieb das Deckelnest auf einen vorher positionierten Batteriekasten samt aufgelegtem Deckel ab, und ermöglicht so, nach lösen der Halteschrauben das Deckelnest samt Batterie seitlich auszuschieben, ohne es händisch anheben zu müssen. Beim Einbau wird in umgekehrter Reihenfolge vorgegangen.

Voraussetzung für die Anwendung dieser Funktion ist die Einstellung des korrekten Parametersatzes und die Verwendung des richtigen Batteriekastens für die Ablage, da nur so die korrekte Höhe angefahren wird.

Einstellmodus

Speziell für Einstellarbeiten, die einen Zutritt zur Maschine erfordern, wurde eine hilfreiche Funktion eingebaut. Für berechnigte Personen bedienbar wurde ein Schlüsselschalter vorgesehen, der die Türsicherung insofern umgeht, dass die Bewegungen der Maschine nicht angehalten, sondern auf minimale Geschwindigkeiten gedrosselt werden, sobald ein Zutritt durch die Servicetüren erfolgt.

Sinn der Sache ist nicht die Umgehung der Sicherheitsmechanismen, sondern die in der Praxis auftretende Situation für Servicezwecke, wo der laufende Betrieb genau überprüft werden muss, was nur durch Betreten der Umhausung möglich ist. Die sonst einzige Möglichkeit wäre die Entfernung der Schutzumhausung oder andersartige Ausschaltung der Sicherheitseinrichtungen bei voll betriebsbereiter Maschine, was in der Praxis die weit gefährlichere Situation darstellt und speziell während und nach der Inbetriebnahmephase immer wieder beobachtet werden kann.

Servicezutritt

Eigens für eine ähnliche Funktion wurden Schlüsselschalter an der Rückseite der Maschine angebracht, die einen Zutritt zu den Reservepositionen der Heizelemente im laufenden Betrieb zur Reinigung durch Servicepersonal ermöglichen. Ein Abschalten der Maschine zu diesem Zweck würde den Sinn des vorheizbaren Reservespiegels entfremden, da dieser genau dafür eingesetzt wird, um die Aufwärmzeiten des Heizelementes zu eliminieren. Dieser Zutritt ist weniger kritisch, da der Bereich von bewegten Maschinenteilen getrennt ist.

Gleich wie für den Einstellmodus wird der Zustand klar ersichtlich am Panel angezeigt und dauerhaft protokolliert.

Kapitel 7

Verifikation an der Maschine

Nach dem Einbau von Grundfunktionalität und möglichen Optimierungen widmet sich dieses Kapitel den an der Maschine durchgeführten Messungen während des Testbetriebes und dem Vergleich dieser Werte mit der Theorie.

7.1 Taktzeitmessung

Als einer der im Produktionsprozess interessantesten Faktoren gilt die erreichbare Taktzeit einer Maschine für die Abschätzung und Planung der Produktionskapazität. Neben den für den Prozess notwendigen Bearbeitungszeiten ergeben die eigentlich unerwünschten Positionierzeiten der Achsen und die sonstigen Bewegungen von Hilfsstellgliedern zusammen die erreichbare Taktzeit für einen Prozesszyklus.

7.1.1 Positionierzeiten

Durch eine Zeitmessung an der Maschine ist es möglich die errechneten Zeiten auf Plausibilität zu prüfen. Mithilfe eines Testbausteins im SPS - Programm wird bei Ausführung jedes Prozessschrittes die Systemzeit in einen Datenbaustein eingetragen, woraus die Gesamtzeit und die für die Achsbewegung notwendige Zeit ermittelt werden kann (Tabelle 7.1).

Unterschiede zwischen den berechneten Werten und den tatsächlichen Ergebnissen sind durch nicht exakt modellierte Mechanik, wie Spiel im Antriebsstrang und Elastizitäten erklärbar. In geringem Ausmaß werden auch Programmlaufzeiten und Kommunikationszeiten einen Einfluss haben. Bemerkenswert ist, dass speziell jene Achsen eine markant längere Positionierzeit als durch die Berechnung ergeben, die durch große Massen die Antriebe durch hohen Momentenbedarf stärker fordern.

Die mögliche Zeitersparnis im gesamten Zyklus kann so noch nicht beurteilt werden, da die Positionierzeiten in Relation zum Gesamtablauf gesehen werden müssen.

Achse	Positionierzeit gemessen [s]	Positionierzeit berechnet [s]
Shuttle horizontal	1,4	1,43
Spiegel horizontal	1,3	1,04
Spiegel vertikal	0,7	0,50
Deckel vertikal	1,1	0,91

Tabelle 7.1: Vergleich der gemessenen und berechneten Positionierzeiten

7.1.2 Zeitaufteilung

Da die Servoachsen nicht immer den vollen Hub mit der vollen Geschwindigkeit ausführen, ist eine Untersuchung des Zeitverbrauches der einzelnen Schritte erforderlich. Mit den Bewegungszeiten der Pneumatikzylinder und dem Ansprechzeiten der Sensoren und Magnetventile summieren sich die Positionierzeiten und die Bearbeitungszeit selbst zur gesamten Zykluszeit auf.

Aus der Messung und Untersuchung der einzelnen Schritte kann eine Aufteilung der Zeiten ermittelt werden (Bild 7.1).

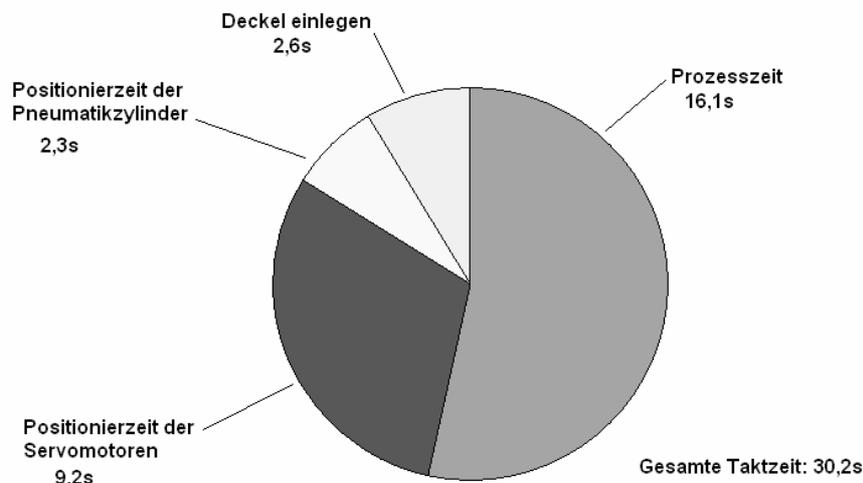


Bild 7.1: Aufteilung der Taktzeit in einem Bearbeitungszyklus

7.1.3 Folgerungen

Aus der Untersuchung ist ersichtlich, dass der überwiegende Teil der Zykluszeit durch den Schweißprozess selbst verursacht wird. Für die Positionierung der Servoachsen wird etwa 1/3 der Gesamtzeit von 30s benötigt, eine Beschleunigung der Achsen unter Ausnutzung aller Sicherheitsreserven würde die Gesamtzeit um 1,6s verkürzen.

Im Zeitablauf ist allerdings noch das Aufnehmen des Deckels vom Batteriekasten eingebaut. Bei Verwendung eines automatischen Deckeleinlegers kann dieser Vorgang parallel ablaufen, und verkürzt somit die Gesamtzeit in jedem Fall auf 27,6s. Bemerkenswert ist weiters, dass die Stellzeiten der Pneumatikzylinder zusammen eine Verzögerung von 2,3s bedeuten, wo der längste Vorgang allein durch das Einklinken des Shuttles und nachfolgendem Rückzug der Positionierstopper zum Batterietransport nahezu unabhängig vom Betriebsdruck 1,6s dauert.

Der Ansatz, den Antrieb mit dem längsten Verfahrensweg durch Tausch des Motors auf eine Type mit doppelter Drehzahl zu beschleunigen zeigt sich als kaum relevant, da damit bei gleich bleibenden Daten für Beschleunigung und Ruck nur eine Zeit von 40ms gewonnen werden könnte.

Es scheint glaubhaft, durch genauere Untersuchung des Prozesses selbst den größten Effekt zur Verkürzung der Taktzeit zu erzielen. Im Versuchslauf konnten durch Anpassen der Prozesseinstellungen und simulierter Einlegevorrichtung Einzelbatterien in etwa 25s durchaus einwandfrei verschweißt werden. Anpassungen am Prozess selbst erfordern aber das Sammeln von Erfahrungswerten und detaillierte Schweißnahtprüfungen, und somit die Produktion von größeren Stückzahlen.

7.2 Antriebsregleruntersuchungen

Als Erweiterung zur Ermittlung der tatsächlichen Achsfahrzeiten kann ein tieferer Blick in die Antriebssysteme dienen. Das Inbetriebnahmewerkzeug für die Antriebe hat eine eingebaute Trace - Funktion zum Aufzeichnen der auftretenden Zeitverläufe der wichtigsten Werte des Antriebes. Damit lassen sich sowohl die Regelparameter untersuchen und einstellen, als auch die Plausibilität der Einstellungen der vier Achsen überprüfen. Zur Überprüfung des Regelverhaltens der Sinamics-Antriebe wurde der von der Technologiegruppe vorgegebene Drehzahlsollwert und der resultierende Drehzahlistwert des Antriebs aufgezeichnet. Zu gering eingestellte Dynamikbegrenzungen würden hier in deutlichen Abweichungen der beiden Kurven resultieren. Nachdem für die Messungen maximale Werte für Hub und Geschwindigkeit eingestellt wurden, werden somit alle betriebsmäßig auftretenden Fahrverläufe überprüft. Ein gleichzeitig dargestellter Drehmomentverlauf, den der Antrieb aus dem Motorstrom ermittelt, lässt auf die tatsächlich auftretenden Lastverhältnisse schließen, die aus den Konstruktionsunterlagen nur annähernd bekannt sind.

7.2.1 Servoantrieb des Shuttles

Die Untersuchung der tatsächlich auftretenden Kurvenverläufe für Drehzahl und Moment (Bild 7.2) bestätigt die gerechneten Werte für den Positionierverlauf teilweise. Zwei nichtlineare Phasen für Beschleunigung und Ruck zu je errechneten 0,5s schließen eine kurze Phase des linearen Bewegungsablaufes mit ein. Durch die Reibung im Antriebssystem und besonders der Batterien auf der Unterlage ist zum Bremsen mit weniger als 10% ein deutlich geringeres Moment als zum Beschleunigen der Last notwendig. Das Aufzubringende Moment ist bei Erreichen der Maximaldrehzahl erkennbar und hängt, wie zu erwarten ist, von der Batteriemasse ab.

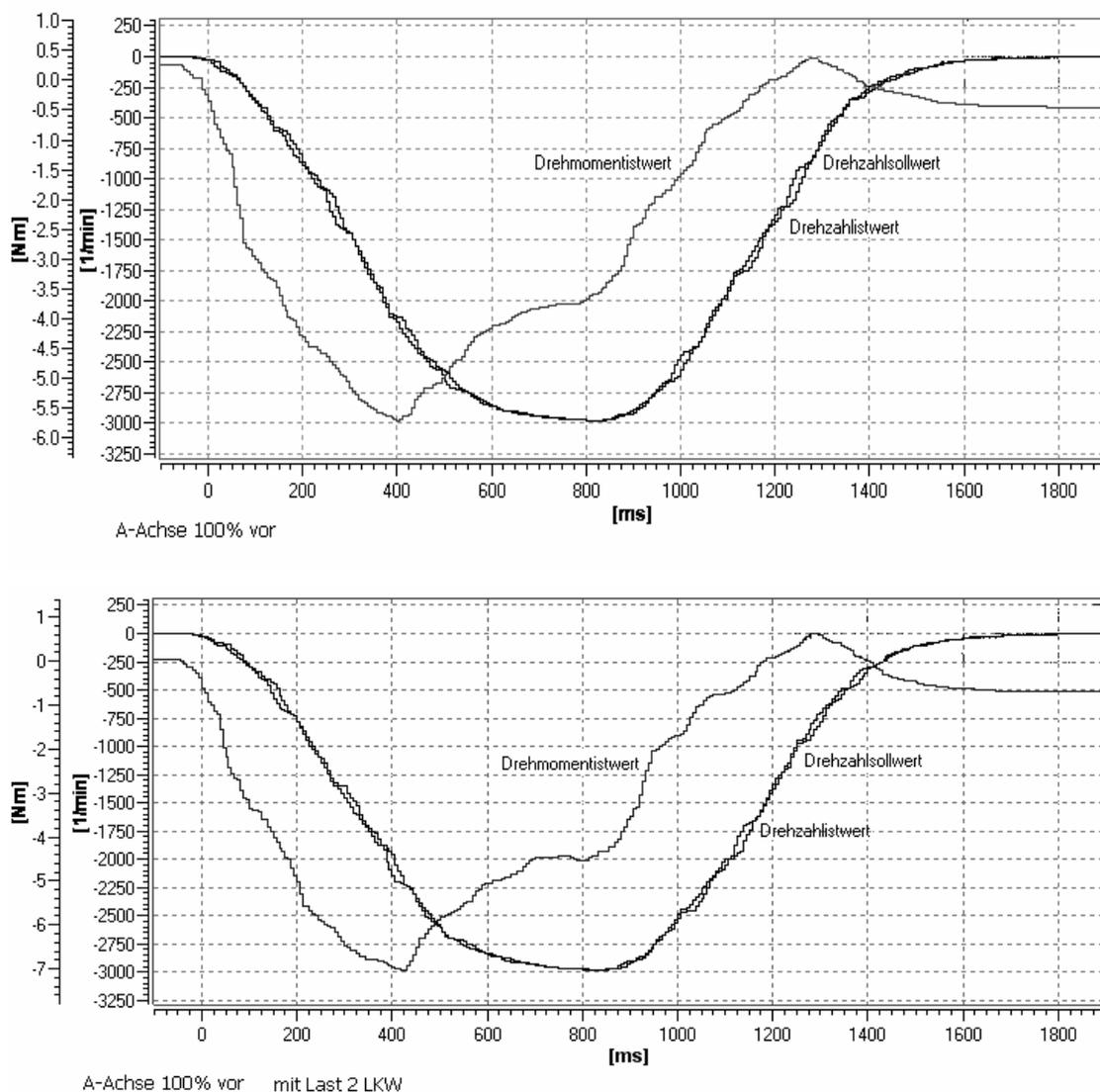


Bild 7.2: Positioniervorgang des Shuttles bei veränderter Last
Unbeladener Zustand (oben) und mit Beladung durch zwei LKW- Batterien (unten)

Die Beladung des Shuttles mit maximaler Batterielast zeigt im Wesentlichen einen deckungsgleichen Kurvenverlauf wie im unbeladenen Zustand. Für die größere Last ist nur ein höheres Motormoment zum Beschleunigen und Bremsen erforderlich um den gleichen Positionierverlauf zu erhalten. Der Regler arbeitet somit im vorgesehenen Bereich wo keine weitere Begrenzung erfolgt.

7.2.2 Servoantrieb des Spiegelvorschubes

Für den horizontalen Spiegelvorschub zeigt sich eine ähnliche Situation (Bild 7.3). Die Phase der linearen Bewegung fällt hier ebenso minimal aus, das Bremsmoment mit etwa 50% des Beschleunigungsmoments lässt auf eine erwartungsgemäß niedrigere Reibung der drei Spindelachsen schließen, die nur kugelgelagerte Massen bewegen müssen.

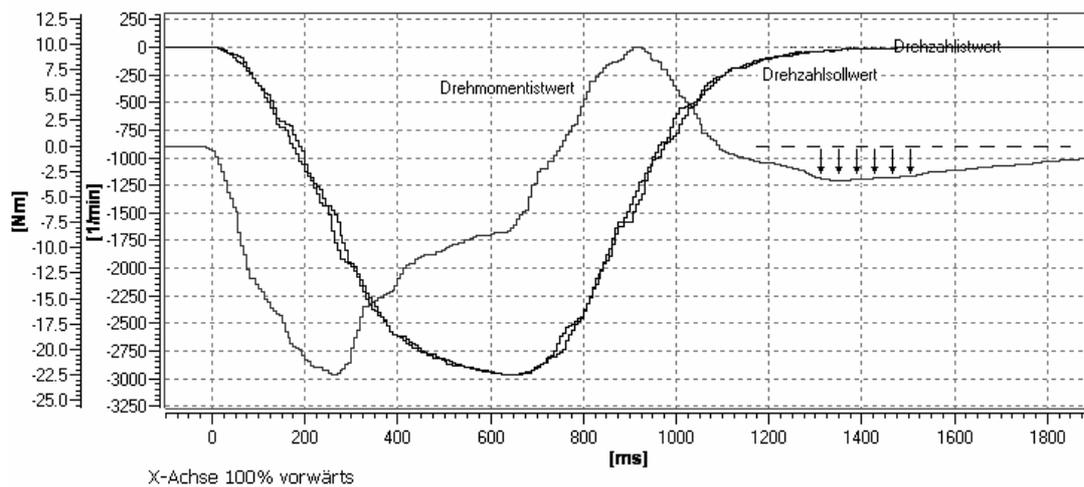


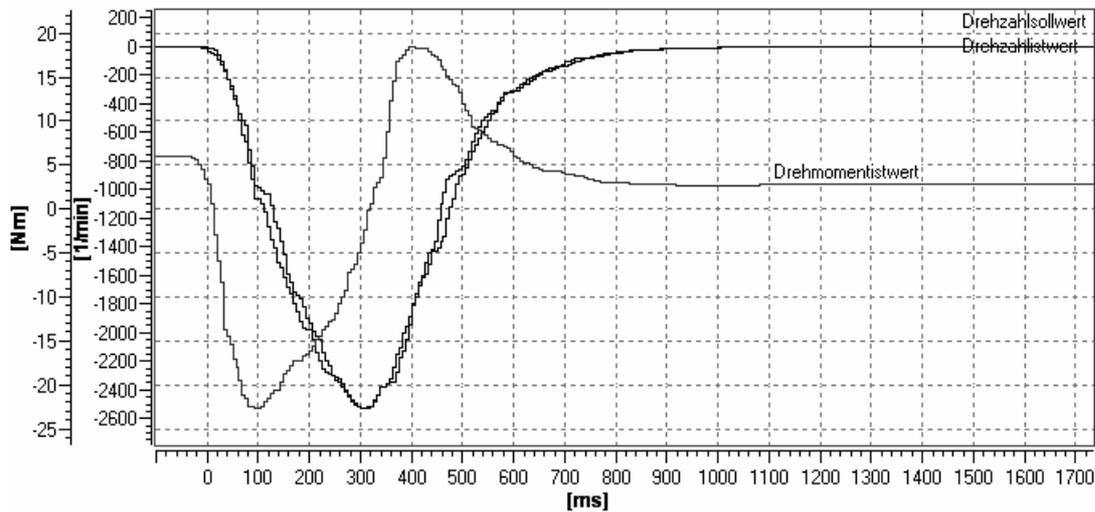
Bild 7.3: Positioniervorgang des Spiegelvorschubes

Beachtenswert ist ein nochmaliges Wechseln der Momentenrichtung nach dem Abbremsen des gesamten Schlittens, was auf eine deutliche Nickbewegung der Mechanik bei der Vorwärtsfahrt durch den vor den Schwerpunkt ragenden massiven Spiegel schließen lässt. Bei Untersuchung der Gegenrichtung ist dieser Effekt erwartungsgemäß weniger erkennbar. Diese Tatsache alleine kann eine Erklärung für den Unterschied zum Rechenwert sein.

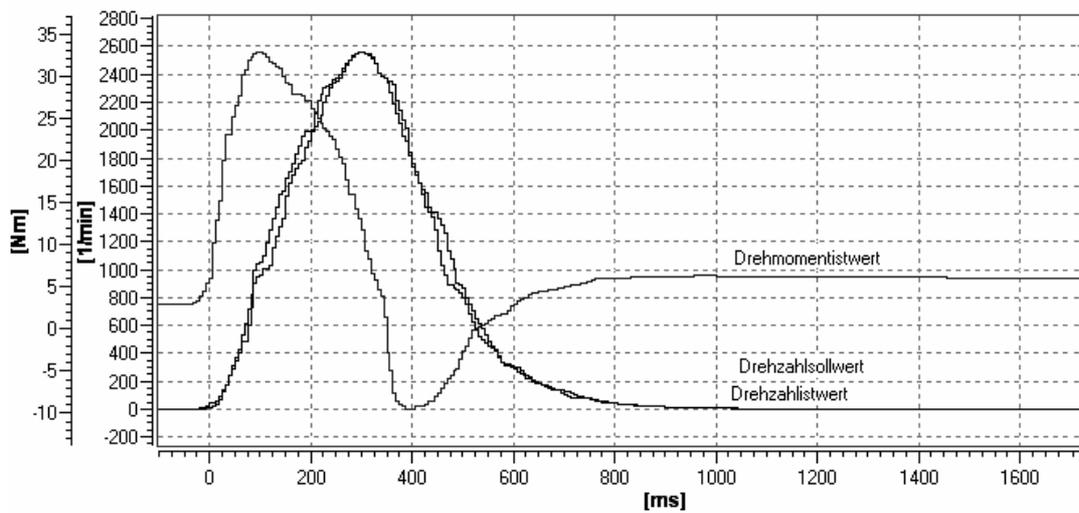
7.2.3 Servoantrieb der Spiegelhubachse

Anders als bei den übrigen Achsen erreicht die vertikale Spiegelachse aufgrund der vergleichsweise geringen Fahrstrecke im Schweißbetrieb die Endgeschwindigkeit nicht, da nach der Hälfte des Weges vom Beschleunigen in den Bremsbetrieb umgeschaltet wird. Die

gesamte Länge des Verfahrensweges wird für die Referenzposition und beim Spiegelwechsel benötigt, wo aber bei beiden Funktionen die Maximalgeschwindigkeit keine Bedeutung hat. Das hohe Stillstandsmoment von 6Nm lässt auf eine in Schwebelage zu haltende Masse von etwa 700kg schließen (Bild 7.4), was der Realität sicher nahe kommt.



Y-Achse 100% abwärts von 1->2



Y-Achse 100% aufwärts von 2->1

**Bild 7.4: Positioniervorgang der Spiegelhubachse
 Prozessschritt Senken (oben) und Heben (unten)**

Im direkten Vergleich der beiden Fahrtrichtungen ist zu erkennen, dass der Spiegelhub mit 30Nm den weitaus größten Momentenbedarf erfordert während beim Absenken sich Beschleunigungs- und Bremsmoment sich die Waage halten.

7.2.4 Servoantrieb der Deckelachse

Die Achse zur Positionierung des Deckelnestes hat im normalen Prozessablauf die längste Phase mit linearem Wegzuwachs. Ihre charakteristische Eigenschaft ist, dass beim Heben eine Verringerung des Antriebsmomentes ausreicht, es braucht hier kein Bremsmoment aufgebracht werden.

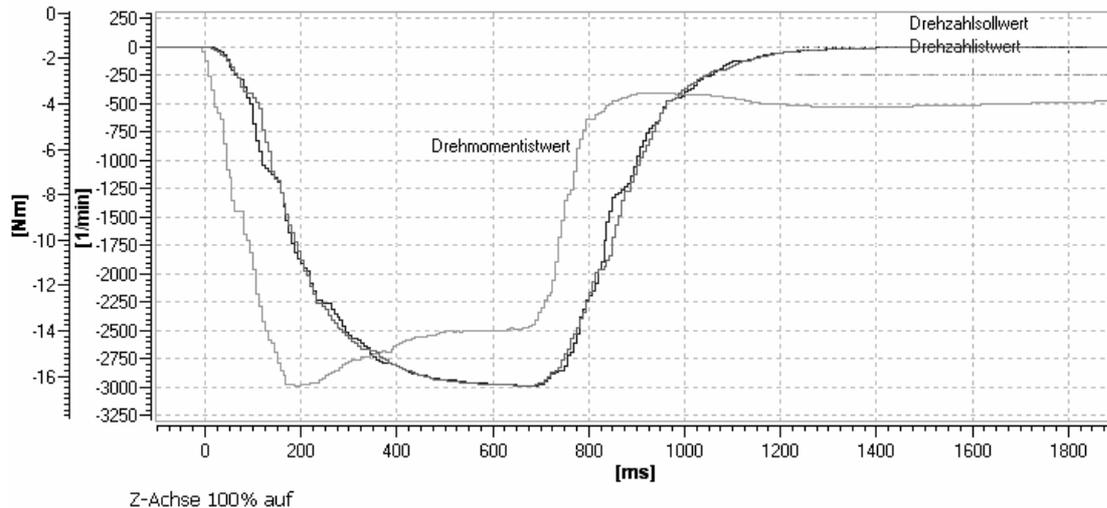


Bild 7.5: Hubvorgang für die Achse der Deckelpositionierung

Das statische Hubmoment von 4 Nm deutet auf eine Masse von Deckelnest und Schlittenkonstruktion von etwa 350kg hin.

7.2.5 Folgerungen

Die Untersuchung der Diagramme aller Achsen zeigt im Wesentlichen die Übereinstimmung der Drehzahlverläufe mit den errechneten Werten. Allen gemeinsam ist, dass die durch den Ruck-Parameter eingestellten Beschleunigungsänderungen, und somit die Momentenverläufe nicht den erwarteten steilen Anstieg erreichen konnten. Aus diesem Grund verlängert sich überall die Beschleunigungsphase zulasten der linearen Fahrzeit, was auch aus den Taktzeitmessungen ersichtlich war.

Am deutlichsten zeigt sich bei den Messungen der beiden horizontalen Achsen die starke Asymmetrie des Momentenverlaufes in Beschleunigungs- und Bremsphasen. Damit würde für die Berechnung des Momentenverlaufes die unzulässige Vernachlässigung der Reibung zu groben Differenzen führen. Wie eine Beladung des Shuttles zeigt, wird aber bei ausreichenden Momentenreserven der Geschwindigkeitsverlauf sehr wohl die erwartete Form haben.

7.3 Temperaturmessungen

Zur Auswahl und Überprüfung der Regelstrategie hilft eine Untersuchung des Temperaturverhaltens der Heizspiegel. Neben der Ermittlung der Zeitkonstanten für den Aufheiz- und Abkühlvorgang zur Ermittlung der regelungstechnischen Eigenschaften ist die Temperaturverteilung auf der Platte selbst von Interesse. Da ein wesentlicher Teil der erzeugten Wärme nicht durch Anwendung auf den Prozess sondern als Verlustwärme durch Strahlung und Konvektion verloren geht, ist eine Ermittlung dieser Zusammenhänge für die Beurteilung des Energieverbrauches interessant.

7.3.1 Ermittlung der Zeitkonstanten

Der maximal mögliche Temperaturanstieg beim Aufheizvorgang mit 50% Heizleistung ist für die Grundplatte mit 3,6 K/min zu ermitteln (Bild 7.6). Nach Erreichen der Solltemperatur am Messpunkt in der Grundplatte nach knapp 2 Stunden geht der Temperaturverlauf in den geregelten Betrieb über. Die sich dabei einstellende Regelschwingung zeigt Maximalwerte von unter $\pm 3^\circ\text{C}$ vom Sollwert, womit eine Zweipunktregelung eine ausreichende Genauigkeit erzielt. Die mittels Infrarot – Pyrometer ermittelte Oberflächentemperatur im Plattenzentrum zeigt durch den Wärmewiderstand der Gussform einen deutlich geringeren Anstieg von etwa 2,4 K/min in der Anfangsphase. Aus diesem Grund ist die Betriebstemperatur des Spiegels erst etwa 30 Minuten nach Erreichen des Sollwertes der Regelung eingetreten.

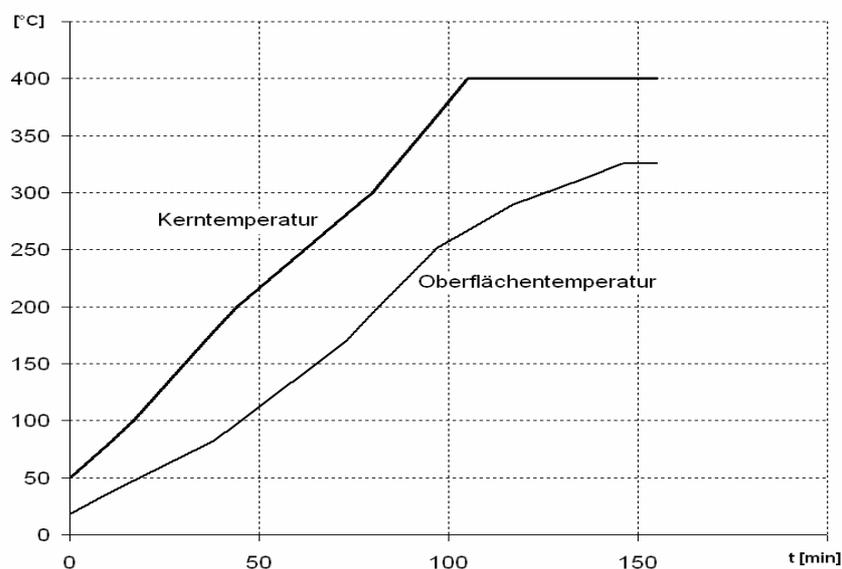


Bild 7.6: Aufheizvorgang des Schweißspiegels

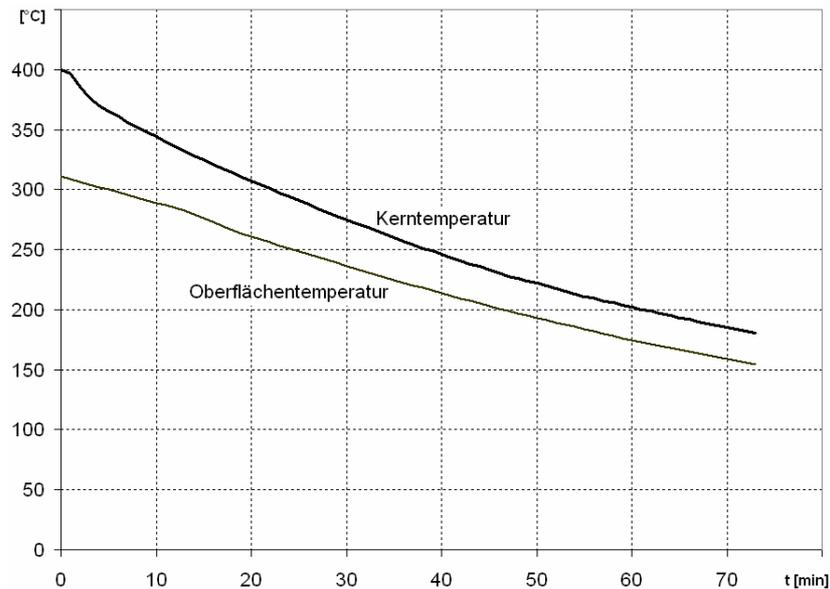


Bild 7.7: Auskühlvorgang des Schweißspiegels

Aus einem Temperaturabfall von etwa 5 K/min zu Beginn der Abkühlphase durch großteils Wärmestrahlung (Bild 7.7) kann auf eine deutlich geringere Energieentnahme durch das Aufschmelzen von Kunststoff geschlossen werden, als durch Wärmeverluste entsteht.

7.3.2 Temperaturverteilung

Zur Ermittlung der Temperaturverteilung auf der Spiegeloberfläche (Bild 7.8) wurde eine kontaktlose punktweise Abtastung der Spiegeloberfläche mittels Pyrometer durchgeführt.

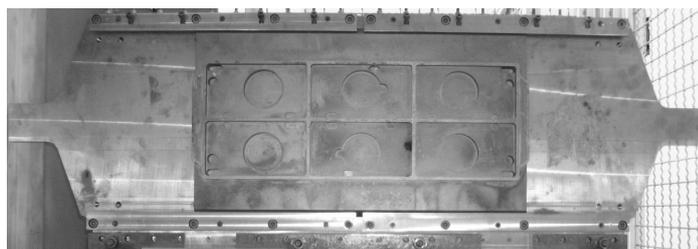


Bild 7.8: Foto des Spiegels in vertikaler Ablageposition mit Blick auf die Deckelform

Bei ausreichender Anzahl von Messpunkten kann aus diesen Einzelpunkten ein Pixelbild erzeugt werden. Hier wurde aus 22 x 46 Messungen durch Normierung ein Graustufenbild erzeugt (Bild 7.9), woraus eine deutlich erhöhte Abstrahlung im Bereich der Gussplatte hervorgeht. Einen direkten Rückschluss auf die Oberflächentemperatur lässt das aber noch nicht zu.

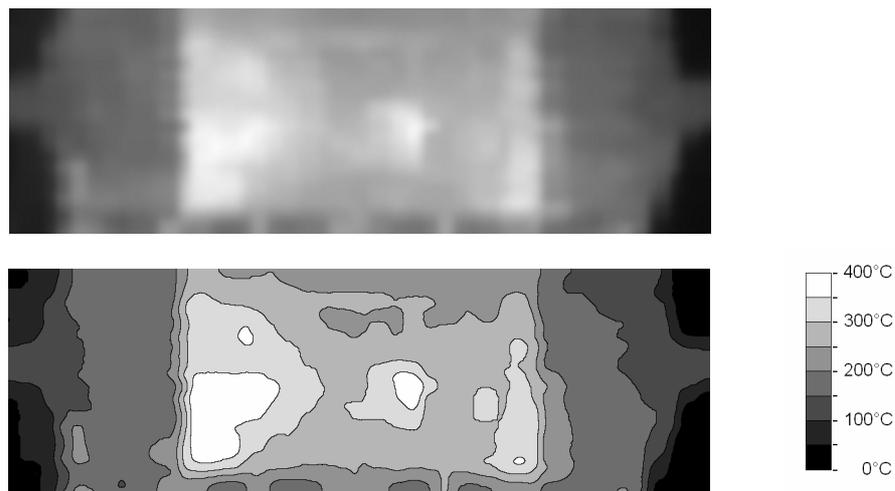


Bild 7.9: Thermografie- und Isothermenbild der abgestrahlten Temperaturverteilung.

Durch die deutlich unterschiedlichen Emissionsgrade für die Grundplatte und den Guss, sowie die starke Abhängigkeit der Emission von Oberflächenstrukturen ergibt sich bei direkter Kontaktmessung mit einem geeigneten Thermometer ein konträres und vor allem einheitlicheres Ergebnis (Bild 7.10):

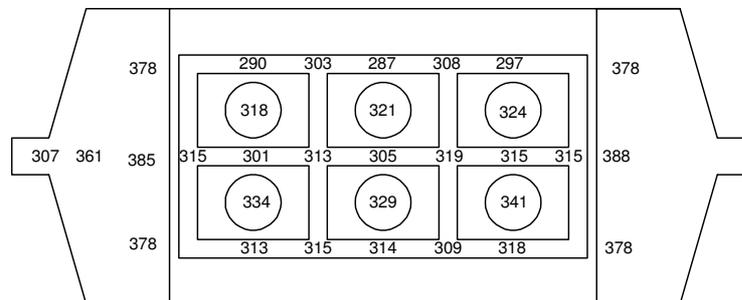


Bild 7.10: Skizze der Temperaturverteilung mittels Kontaktmessung

Die tatsächliche Temperatur der Rippenoberflächen weicht kaum von der Kundenanforderung ab, und die wesentlich schwächer abstrahlende Grundplatte ist eigentlich deutlich heißer. Die Kontaktmessung an der Spiegelunterseite zeigt einen nahezu homogenen Temperaturverlauf zwischen 325 und 330°C auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Gussform der Spiegelunterseite aus einer dicken Platte ohne Oberflächenstruktur besteht.

Als Konsequenz ist daraus zu sehen, dass mittels Strahlungsmessung bzw. einer Wärmebildkamera die Oberflächentemperatur nicht korrekt ermittelt werden kann, solange der exakte Emissionsgradverlauf der Oberfläche nicht bekannt ist. Für Vergleichsmessungen bei unterschiedlichen Leistungseinspeisungen ist die Methode aber sehr wohl brauchbar.

Eine weitere Erkenntnis ist eine etwa 90° geringere Oberflächentemperatur an den kontaktierenden Rippen, als durch die Regelung vorgegeben wird.

7.4 Leistungsmessungen

Eine weitere Untersuchung befasst sich mit der Teilabschaltung von peripheren Heizstäben. Hier soll ein Vergleich die Effizienz einer Energieeinsparung ermitteln. Durch die Abschaltung der beiden äußeren von 10 Heizstäben wird sich die mittlere Plattentemperatur nicht ändern, da die Regelung diesen Effekt ausgleicht. Sehr wohl ist aber das Ergebnis aus einer Vergleichsmessung mit dem Pyrometer über einen horizontalen Schnitt der Platte erkennbar. Die abfallende Abstrahlung lässt deutlich den Ort der abgeschalteten Stäbe erkennen, da die Temperatur dort um etwa 50°C absinkt (Bild 7.11).

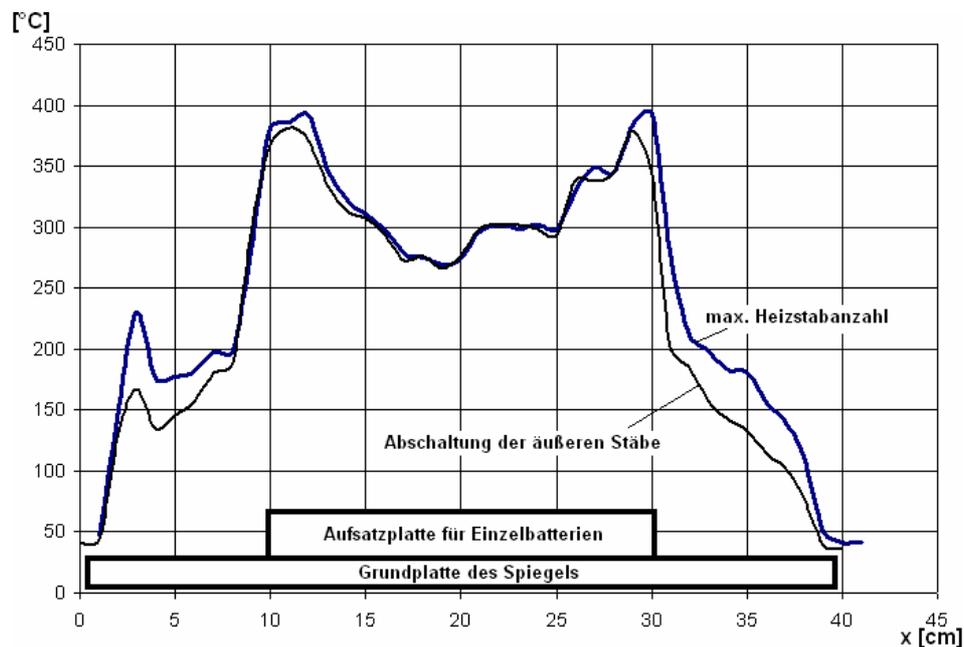


Bild 7.11: Horizontaler Schnitt des Strahlungsverlaufes bei Abschaltung von Heizstäben

Die Ermittlung über die sich einstellende Schwingung aus Heizphase und Pausenzeit ergibt eine Erhöhung von 11% für die effektive Heizleistung der übrigen Stäbe, zusammen also eine Einsparung von 12% der Heizleistung im vorhandenen Aufbau.

Daraus kann geschlossen werden, dass durch die Abschaltung der äußeren Heizstäbe bei Batteriesätzen die einzeln produziert werden sehr wohl eine Energieeinsparung erzielt werden kann. Die erwartete Schonung der äußeren Heizstäbe wird allerdings mit einer stärkeren Belastung der übrigen Stäbe erkaufte. Da diese Abschaltung im Batteriesatz implementiert wurde, kann sie typenabhängig angewählt werden.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einer bestehenden Montagelinie zur Batterieproduktion zu erhöhen, wurde die Neukonstruktion einer Spiegelschweißmaschine veranlasst. Diese Maschine soll für alle Standard-Batterietypen verwendbar sein und für die Serienproduktion eingesetzt werden. Aufgrund der Typenvielfalt der Batterien soll die Umrüstung rasch erfolgen können und damit eine einfache Bedienung aller relevanten Prozesseinstellungen möglich sein.

Aufgabe dieser Diplomarbeit war es, die Maschine durch Entwerfen eines Steuerungsprogrammes in Betrieb zu setzen. Mithilfe von weitergehenden Tests sollte ein optimierter Schweißvorgang erreicht und ein einfaches Bedienkonzept für die leistungsfähige Hardware entwickelt werden.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde in zwei Phasen vorgegangen:

Als erster Schritt wurden die Einsatzumgebung der Maschine und die dafür übliche Technik erörtert. Mithilfe dieses Überblicks wurden die Details der Heizelement-Schweißtechnik analysiert. Im Besonderen wurden die einzelnen Phasen dieser Technik dargestellt und der Zusammenhang zwischen lage- und kraftgeregeltem Betrieb der Positionierantriebe zur Schweißqualität erörtert. Zur Ermittlung der Prozesszeiten wurden die Vorschubbewegungen der Servoachsen genauer analysiert und für die Mechanik Modelle erarbeitet. Den Abschluss dieser allgemeinen Untersuchungen bildeten Qualitätskriterien, wodurch auf geeignete Korrekturmaßnahmen für den Prozess geschlossen werden kann. Daran anschließend wurde die vorhandene Technik genauer dargestellt um aus den Eigenschaften der Heizsteuerung und des Antriebssystems ein Bedienkonzept entwerfen zu können. Für dieses Konzept war im Weiteren ein Überblick über die vorhandenen Bedienmöglichkeiten und die zur Verfügung stehenden Softwarewerkzeuge zu erlangen.

Ausgehend von diesen theoretischen Erkenntnissen wurde das Steuerungskonzept entwickelt und das Ablaufprogramm gemeinsam mit den notwendigen Zusatzfunktionen erstellt. Durch die Konfiguration der Sinamics - Antriebselektronik und der Erstellung einer Bedienoberfläche für das Touchpanel wurde die Maschine in Betrieb gesetzt. Damit konnten bereits einfache Verschweißungen an Testbatterien durchgeführt, und damit die Funktionsfähigkeit der mechanischen Konstruktion verifiziert werden.

In einem zweiten Schritt wurde durch Messungen und Versuchsläufe das Potential für Optimierungen an diesem Testkonzept erhoben. Durch Aufspalten und Parallelisieren von

Teilabläufen konnte eine Takzeitverkürzung erzielt werden. Weitere Optimierungen konnten für die Temperaturregelung und den Energieverbrauch gefunden werden, indem eine koordinierte Ansteuerung der Heizstäbe durchgeführt wurde.

Eine wesentliche Verbesserung für die Bedienerschnittstelle wurde durch den Einsatz von Elementen aus modernen grafischen PC-Bedienoberflächen auf dem Touchpanel einer Steuerung erreicht. Zusammen mit Hilfsfunktionen für die Parametrierung der Maschine und für Servicearbeiten und Fehlersuche wurde eine vereinfachte und übersichtlichere Bedienung geschaffen.

Den Abschluss dieser Arbeit bildeten Untersuchungen des gefundenen Optimierungspotentials an der Maschine. Die mögliche Zeiteinsparung bei Annähern an die mechanischen Grenzen der Antriebe wurde in die Relation zur gesamten Prozesszeit gesetzt und die dabei auftretenden Vorschubbewegungen genauer betrachtet. Zur Überprüfung des Temperaturverhaltens wurden Aufheiz- und Abkühlvorgänge untersucht, sowie die Plattenoberflächentemperaturen ermittelt, um auf die prozessrelevanten Eigenschaften schließen zu können.

Durch diese Vorgangsweise konnte das optimierte Steuerungsprogramm für eine Spiegelschweißmaschine erfolgreich implementiert werden. Die Praxistauglichkeit wird im Serienbetrieb seit mittlerweile mehreren Wochen unter Beweis gestellt.

Offen geblieben sind zum Zeitpunkt dieser Arbeit Versuche mit allen unterschiedlichen Batterietypen, da noch nicht die gesamte Mechanik verfügbar war. Für besondere Kombinationen von Kunststoffen und Spiegelvarianten ²⁾ könnten spezielle Fahrverläufe Verbesserungen bringen, die derzeit nicht eingesetzt werden. Durch Verwendung von erweiterten Technologiefunktionen der Steuerung sollten Abschmelzverläufe möglich sein, die sich von den einfachen Positioniervorgängen dieses Steuerprogramms unterscheiden. Denkbar wäre eine Synchronisation der Deckelbewegung auf den bewegten Spiegel bei fest vorgegebener Endposition. Damit könnten Materialvariationen wie es bei Recyclingkunststoffen der Fall ist bei optimalen Abschmelzgeschwindigkeiten verarbeitet werden, was derzeit nur durch komplizierte Parametereingaben erreichbar ist.

²⁾ Der Abschmelzvorgang des Deckels erfolgt durch langsames Annähern an den bewegten Spiegel, der wiederum selbst den Batteriekasten abschmilzt. Da beide Abschmelzwege parametrierbar sind, wird derzeit die Deckelgeschwindigkeit so angepasst, dass nach gemeinsamem Startzeitpunkt auch gleichzeitig das Ziel erreicht wird. Für unterschiedliche Kunststoffe und Heizplattengeometrien bzw. Oberflächentemperaturen hängt das optimale Ergebnis aber von der Schmelzgeschwindigkeit ab. Deswegen können als Ersatzvariante zusätzlich beide Geschwindigkeiten vorgegeben werden, wodurch aber unterschiedliche Endzeitpunkte entstehen können. Die optimale Strategie müsste die Startzeitpunkte in Abhängigkeit von Wegen und Geschwindigkeiten festlegen, was nur durch Kurvenberechnung mithilfe der Technologiefunktionen einfach lösbar ist.

Literaturverzeichnis

- [Bar95] Heinz Bartels: „Physiologie“, Urban & Schwarzenberg, München, 1995
(ISBN 3-541-09055-3)
- [Bes99] Jürgen O. Besenhard: „Handbook of Battery Materials“, Wiley VCH, 1999
(ISBN 3-527-29469-4)
- [Bau97] Werner Baumann: „Batterien - Daten und Fakten zum Umweltschutz“, Springer, 1997 (ISBN 3-540-61594-6)
- [Cro00] T. R. Crompton: „Battery Reference Book“, Butterworth-Heinemann, 2000
(ISBN 0-7506-4625-X)
- [Dvs03] DVS - Berichte Band 226: „Fügen von Kunststoffen in der Serienfertigung und im Rohrleitungs- und Behälterbau“, DVS Verlag, Düsseldorf, 2003
(ISBN 3-87155-684-X)
- [Dvs99] Peter Michel: „Schweißverfahren in der Kunststoffverarbeitung, Grundlagen und Aspekte zur Serienfertigung“, DVS-Berichte Band 203, DVS Verlag, Düsseldorf, 1999 (ISBN 3-87155-660-2)
- [Dvs2207] DVS-Richtlinie 2207-11: „Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen – Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PP“, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [Dvs2215] DVS-Richtlinie 2215-2: „Heizelementschweißen von Formteilen aus Polyolefinen (PE, PP) in der Serienfertigung“, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [Eur07] „Europa in Zahlen“ Eurostat-Jahrbuch 2006-2007 (ISBN 92-79-02488-4)
- [Ehr04] Gottfried W. Ehrenstein: „Handbuch Kunststoff Verbindungstechnik“, Carl Hanser Verlag, München, 2004 (ISBN 3-446-22668)
- [Fav04] Bernard Favre-Bulle: „Automatisierung komplexer Industrieprozesse“, Springer, Wien - New York, 2004 (ISBN 3-211-21194-2)
- [Jae94] Kurt Jäger: „Geschichte der Elektrotechnik – Gespeicherte Energie“, VDE Verlag GmbH, Berlin, 1994 (ISBN 3-8007-2046-9)
- [Lin94] David Linden: „Handbook of Batteries“, McGraw-Hill Companies, 1994
(ISBN 0-0703-7921-1)

- [MRL06] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), <http://eur-lex.europa.eu>
- [MRL98] Richtlinie 98/37/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Juni 1998 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Maschinen, <http://eur-lex.europa.eu>
- [NRL06] Richtlinie 2006/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 2006 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen, <http://eur-lex.europa.eu>
- [NRL73] Richtlinie des Rates vom 19. Februar 1973 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten betreffend elektrische Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen (73/23/EWG),
<http://eur-lex.europa.eu>
- [Sch98] Manfred Schrödl: „Elektrische Antriebe und Maschinen“, Vorlesungsunterlagen, Technische Universität Wien, 1998
- [Sie07] Siemens: „SIMATIC S7T Config“, Version 4.0, Engineering Tool zur Konfiguration von Sinamics Antrieben aus dem Softwarepaket S7-Technology, 2007
<http://www.automation.siemens.com>
- [Zei00] Gerfried Zeichen: „Automatisierte Industrieprozesse“, Springer, Wien - New York, 2000 (ISBN 3-211-83560-1)

Abbildungsverzeichnis

<i>Bild 1.1: Spiegelschweißmaschine mit Bedieneinheit an der Schutzumhausung</i>	2
<i>Bild 2.1: Montageprozess einer Starterbatterie</i>	6
<i>Bild 2.2: Methoden zum Schweißen von Kunststoffen</i>	10
<i>Bild 2.3: Hauptfunktionen einer Spiegelschweißmaschine</i>	11
<i>Bild 3.1: Darstellung der Phasen beim Heizelementschweißen</i>	17
<i>Bild 3.2: Verfahrensablauf beim Heizelementschweißen mit Kraftvorgabe</i>	17
<i>Bild 3.3: Druck- und Wegverlauf für die Angleichphase</i>	18
<i>Bild 3.4: Schnittbilder – Geometrie der Fügenaht und Prinzip des Nahtaufbaus</i>	20
<i>Bild 3.5: Druck- und Wegverlauf für die Fügephase</i>	21
<i>Bild 3.6: Bewegungsphasen eines Positioniervorganges für eine Servoachse</i>	23
<i>Bild 3.7: Modell eines horizontalen Riemenantriebes</i>	26
<i>Bild 3.8: Modell eines horizontalen Spindelantriebes</i>	27
<i>Bild 3.9: Vertikaler Spindelantrieb im Modell</i>	28
<i>Bild 4.1: Temperaturprofil beim Aufschmelzen von Kunststoff</i>	33
<i>Bild 4.2: Schematische Darstellung des Temperaturreglers</i>	35
<i>Bild 4.3: Leistungselektronik und Steuerung der Servoantriebe (Sinamics)</i>	37
<i>Bild 4.4: Blockdiagramm der verteilten Kaskadenregelung</i>	39
<i>Bild 4.5: Elektrisches Versorgungssystem der Spiegelschweißmaschine</i>	40
<i>Bild 4.6: Pneumatiksystem der Spiegelschweißmaschine</i>	42
<i>Bild 4.7: Prinzip des Shuttle – Mechanismus</i>	44
<i>Bild 4.8: Zentrale Benutzerschnittstelle</i>	46
<i>Bild 5.1: Standardsequenz im Automatikbetrieb des Deckelschweißens</i>	51
<i>Bild 6.1: Abhängigkeiten der parallelen Automatikabläufe</i>	60
<i>Bild 6.2: Grundkonzept der Steuersignalformung für beide Heizplatten</i>	64
<i>Bild 6.3: Umrechnung von Positionen aus der Produktperspektive auf Achspositionen</i>	69
<i>Bild 6.4: Klassischer baumförmiger Aufbau eines Bedienmenüs</i>	72
<i>Bild 6.5: Modifizierte Menüstruktur zur Minimierung der Bedienschritte</i>	73
<i>Bild 6.6: Beispielhaftes Bild zur Handbedienung der Maschine</i>	75
<i>Bild 6.7: Miniatursymbole zur Visualisierung von Bitmeldungen</i>	79
<i>Bild 6.8: Visualisierung des Bewegungszustandes einer Servoachse</i>	80
<i>Bild 7.1: Aufteilung der Taktzeit in einem Bearbeitungszyklus</i>	83
<i>Bild 7.2: Positioniervorgang des Shuttles bei veränderter Last</i>	85
<i>Bild 7.3: Positioniervorgang des Spiegelvorschubes</i>	86

<i>Bild 7.4: Positioniervorgang der Spiegelhubachse</i>	<i>87</i>
<i>Bild 7.5: Hubvorgang für die Achse der Deckelpositionierung.....</i>	<i>88</i>
<i>Bild 7.6: Aufheizvorgang des Schweißspiegels</i>	<i>89</i>
<i>Bild 7.7: Auskühlvorgang des Schweißspiegels</i>	<i>90</i>
<i>Bild 7.8: Foto des Spiegels in vertikaler Ablageposition mit Blick auf die Deckelform</i>	<i>90</i>
<i>Bild 7.9: Thermografie- und Isothermenbild der abgestrahlten Temperaturverteilung.</i>	<i>91</i>
<i>Bild 7.10: Skizze der Temperaturverteilung mittels Kontaktmessung.....</i>	<i>91</i>
<i>Bild 7.11: Horizontaler Schnitt des Strahlungsverlaufes bei Abschaltung von Heizstäben..</i>	<i>92</i>

Tabellenverzeichnis

<i>Table 6.1: Mögliche Zeitersparnis durch maximale Achsbeschleunigung.....</i>	<i>62</i>
<i>Table 6.2: Zuordnung der Heizstäbe zu Außenleitern und versetzten Steuersignalen</i>	<i>65</i>
<i>Table 7.1: Vergleich der gemessenen und berechneten Positionierzeiten</i>	<i>83</i>