

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DISSERTATION

THEMA:

DIE WESENTLICHEN PROZESSPARAMETER ZUR MASCHINELLEN HERSTELLUNG VON STAMPFKONTAKTEN FÜR KOHLEBÜRSTEN

AUSGEFÜHRT ZUM ZWECK DER ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES EINES
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN UNTER DER LEITUNG VON

**O. UNIV. PROF. DIPL.-ING. DR. TECHN. DR. H. C. MULT.
PETER KOPACEK**

INSTITUT FÜR HANDHABUNGSGERÄTE UND ROBOTERTECHNIK,

**UNIV. DOZ. HOFRAT O. UNIV. PROF. DIPL.-ING. DR. TECHN. DR. H. C. MULT.
PETER HERBERT OSANNA**

INSTITUT FÜR FERTIGUNGSTECHNIK,

EINGEREICHT AN DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT WIEN,
FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU

VON

NAME: KUCERA, GERNOT DIETER

ADRESSE: HERMESSTRASSE 145, A-1130 WIEN

MATR. NR.: 6026191

GEBURTSDATUM: 17.01.1942

GEBURTSORT: BAD VÖSLAU, ÖSTERREICH

WIEN, IM MAI 2004

DANKSAGUNG

Ich möchte mich bei der Fa. *Schunk* für die Unterstützung während der Arbeiten für diese Dissertation bedanken, insbesondere das zur Verfügung stellen der Infrastruktur und Einrichtungen für die Versuche, die notwendigen Materialien für die Herstellung der Stampfkontakte sowie die Mess- und Analyseeinrichtungen.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Balzer vom Stammhaus der Fa. *Schunk* in Gießen. Er stand mir mit seiner langjährigen Erfahrung und praktischen Denkweise in vielen Diskussionen zur Verfügung und hat geholfen, meine Ideen aus der Sicht der industriellen Praxis zu bewerten. Dies hat bei mir neue Fragestellungen und Ideen zu deren Lösung aufgeworfen. Auf seine Veranlassung standen mir die nötigen Materialproben zur Verfügung. Wichtige Impulse entstammen aus den von ihm überlassenen Unterlagen und Fachliteratur.

Herr Kübler vom Werk Wien der Fa. *Schunk* danke ich besonders für die Möglichkeit Versuche und Messungen an den Produktionsmaschinen durchzuführen. Auch er war ein sehr geschätzter Diskussionspartner bei der Interpretation der erzielten Messergebnisse.

Meiner Frau Maria möchte ich für das Verständnis während der Arbeit, welche neben dem Beruf naturgemäß viele Nachtstunden in Beschlag nahm, herzlich danken.

KURZFASSUNG

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den wesentlichen Prozessparametern zur maschinellen Herstellung von Stampfkontakten für Kohlebürsten.

In der automatisierten Fertigung dieser werden immer höhere Anforderungen an die Qualität des Endproduktes bezüglich Einhaltung von Toleranzgrenzen gestellt. Als Lösungsmöglichkeit wird die Steigerung der Wiederholgenauigkeit in bezug auf Pulvermenge, Schlagenergie und Anzahl der Verdichtungsschläge beim Stampfvorgang eines Kabelanschlusses an die Kohlebürste untersucht.

Noch heute (2004) wird die Festlegung wichtiger Parameter der Erfahrung des Arbeiters an der Stampfmaschine überlassen. Er bestimmt damit indirekt auch die Qualität des Endproduktes. Die Qualität wird in der Regel nur dadurch gesichert, dass von Zeit zu Zeit eine genügend große Anzahl gefertigter Kohlebürsten der laufenden Produktion entnommen und geprüft werden.

Um Produkte mit bestimmten Eigenschaften zu erzeugen, wird die Verstellmöglichkeit von in der Regel voneinander abhängigen Maschinenparametern erforderlich. Diese Abhängigkeiten werden gezeigt und Fragestellungen zu den Parametern, deren Zusammenwirken, Beeinflussung und den Auswirkungen bei ihrer Verstellung auf das Endprodukt beantwortet.

Als Methode wird die Aufzeichnung und Auswertung der Bewegungsabläufe angewendet. Auf Grund der Analyse dieser Aufzeichnungen ist die Idee zur Entwicklung eines Stampfcontrollers entstanden. Dieser Co-Prozessor, der ähnlich den üblicherweise in der Computertechnik zur Entlastung des Hauptprozessors bekannten Controllern arbeitet, bildet den Schlüssel für die exakte Kontrolle der Stampfung.

In der ersten Generation der Stampfcontroller werden Festwerte für Impuls- und Pausenzeiten verwendet. Das Infragestellen dieser Vorgehensweise führt zu erweiterten Konzepten und Programmvarianten. Insbesondere kann das Einbeziehen der Fähigkeit, Berechnungen und hochgenaue Zeitmessungen durchzuführen, in der Kontrolle des Stampfvorganges genutzt werden.

Grundlegende Erkenntnisse stammen aus Materialuntersuchungen der verwendeten Pulver, die in Versuchen überprüft wurden und aus Messungen nach Stampfversuchen an fertigen Kohlebürsten. Die erzielte höhere Festigkeit ist in der Regel mit einem geringeren Übergangswiderstand gleichzusetzen.

ABSTRACT

This thesis deals with the most significant parameters of the automatic production of cable connections by tamping for carbon brushes.

During the automatic production there are ever increasing requirements concerning the quality of the final product with regard to compliance of production tolerances. As a possible solution the increase in precision regarding the amount of powder, kinetic energy and the number of combustion strokes during tamping of a cable connection to the carbon brush will be discussed.

Even today (2004) the decision about important parameters is left to the experience of the worker operating the machinery. He so indirectly decides also on the quality of the final product. Basically quality assurance is done in such a way that from time to time a sufficiently large quantity of produced carbon brushes is taken from the actual production and examined.

To produce goods with certain properties it is necessary to have the possibility of modifying certain machine parameters depending on each other. These dependencies are shown and questions are answered about the parameters, their interaction, influences and the effects changing them has on the final product.

The method used documents and interprets the motion sequences. Based on the analysis of these documentations the idea was born to develop a tamping control computer. This coprocessor, working similarly to genuinely known controllers in computer science by trying to remove some workload from the main processor, is the key to exact control of tamping.

The first generation of tamping controllers uses hard coded values for momentum and delay times. Questioning this technique has led to extended concepts and program variants. Especially the capability of making exact calculations and highly precise time measurements can be used during control of the tamping process.

Basic knowledge comes from material tests of the powders in use which were tested during trials on the one hand and from measuring after tamping trials on the final carbon brush results on the other hand. The increased strength is, in general, equal to a lower milli-voltage drop.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization

SCHLÜSSELBEGRIFFE

Kohlebürste
Stampfkontakt
Stampfpulver
Knoten
Schlagenergie
Verdichtungsschlag
Übergangswiderstand
Ausreissfestigkeit

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
1.1	ENTWICKLUNG DER KOHLEBÜRSTENFERTIGUNG	3
1.2	KONZEPT DER AUTOMATISIERTEN KOHLEBÜRSTENFERTIGUNG	5
1.2.1	MECHANISCHE BAUGRUPPEN	10
1.2.2	DAS STEUERUNGSKONZEPT	12
1.3	DER STAMPFKOPF	12
1.4	BEANSPRUCHUNGEN DER KOHLEBÜRSTEN DURCH DEN FERTIGUNGSPROZESS	15
1.4.1	BEANSPRUCHUNGEN BEIM ABSENKEN DES WERKZEUGES	16
1.4.2	BEANSPRUCHUNGEN BEIM STAMPFEN	17
1.5	DER STAMPFVORGANG	18
1.5.1	MATERIALEIGENSCHAFTEN DER KOHLEBÜRSTE	18
1.5.2	MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS	19
1.5.3	DER ELEKTRISCHE WIDERSTAND VON WERKSTOFFEN	21
1.5.4	ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS	25
1.5.5	DER VERDICHTUNGSVORGANG DES STAMPFPULVERS	25
1.5.6	ZEITLICHER ABLAUF	27
1.6	DER DREHSCHIEBER	29
1.7	DAS STAMPFNIVEAU	30
2.	AUFGABENSTELLUNG	33
2.1	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES	33
2.2	ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES	34
2.3	BEARBEITUNGSVORSCHRIFTEN	35
2.4	QUALITÄTSANFORDERUNGEN	36
3.	NORMEN UND VORSCHRIFTEN	38
3.1	NORMEN	38
3.2	VORSCHRIFTEN	39
4.	MODELLE UND VERSUCHSANORDNUNGEN	41
4.1	MODELL FÜR DAS STAMPFNIVEAU	41

4.2	MODELL FÜR DAS AUFSETZEN	44
4.2.1	ABBREMSEN EINER BEWEGUNG VOR ERREICHEN DER ENDLAGE	45
4.2.2	SCHALTUNGSVARIANTEN	47
4.2.3	PROGRAMMVARIANTEN	48
4.3	MODELL DER SCHLAGBEWEGUNG	50
4.4	MODELL DES VERDICHTUNGSVORGANGES	55
4.5	VERSUCHSANORDNUNG ZUR KRÄFTEBESTIMMUNG	56
4.5.1	VORSCHLAG FÜR EINEN VERSUCHSAUFBAU	57
4.5.2	ERSTE VERSUCHE	60
4.6	MODELL DES STAMPFKONTAKTES	63
5.	VERSUCHE UND MESSUNGEN	66
5.1	LUFTIMPULSERZEUGUNG DURCH DEN DREHSCHIEBER	66
5.2	EINFLUSS DER ZUGFEDERN	76
5.3	MESSUNG UND AUFZEICHNUNG DER BEWEGUNGSABLÄUFE	77
5.4	MESSEINRICHTUNG FÜR DIE AUFZEICHNUNG DER BEWEGUNGEN	81
5.4.1	DAS WEGMESSSYSTEM	81
5.4.2	DER OSZILLOGRAPH	82
5.5	ÜBERWACHUNG DER DREHSCHIEBERSTELLUNGEN	83
5.6	DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN	88
5.6.1	1. MESSREIHE	88
5.6.2	ERSTE ABSCHÄTZUNG DES MESSFEHLERS	94
5.6.3	2. MESSREIHE	95
5.6.4	3. MESSREIHE	98
5.6.5	4. MESSREIHE	102
5.7	ANALYSE UND AUSWERTUNG DER MESSUNGEN	106
5.7.1	DIE SCHLAGFREQUENZEN	106
5.7.2	VERZÖGERUNG DER BEWEGUNGEN BEI KONSTANTER SCHLAGFREQUENZ	107
5.7.3	VERZÖGERUNG DER BEWEGUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHER SCHLAGFREQUENZ	110
5.7.4	WEITERE ÜBERLEGUNGEN ZUR MESSMETHODE UND ZUR ABSCHÄTZUNG DES MESSFEHLERS	115
5.7.5	DER EINFLUSS DER ZUGFEDERN	116
5.7.6	SCHLAGENERGIE	118
5.7.7	ZUSAMMENFASSUNG	120
6.	QUALITÄTSKRITERIEN UND NACHWEIS DEREN EINHALTUNG	121
6.1	MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS BEI DER VERPRESSUNG	121

6.1.1	PROBENHERSTELLUNG FÜR DIE ERSTE VERSUCHSREIHE	121
6.1.2	1. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 1	124
6.1.3	2. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 3	126
6.1.4	3. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 6	129
6.1.5	WEITERE UNTERSUCHUNGEN	131
6.1.6	ZUSÄTZLICHE VERSUCHSIDEEN	131
6.1.7	PROBENHERSTELLUNG FÜR DIE ZWEITE VERSUCHSREIHE	132
6.1.8	4. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 1	135
6.1.9	5. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 3	137
6.1.10	6. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 6	139
6.1.11	ERSTE ZWISCHENERGEBNISSE	142
	ERSTE VERSUCHSREIHE	142
	ZWEITE VERSUCHSREIHE	143
6.2	MESSUNGEN DER ELEKTRISCHEN EIGENSCHAFTEN	145
6.2.1	DAS MESSPRINZIP	145
6.2.2	WEITERE MESSMETHODEN	149
	MESSPRINZIP DER WIRBELSTROMSONDE	149
	MESSUNGEN MIT DER WIRBELSTROMSONDE	150
	MESSUNGEN AN DEN PROBEN DER VERSUCHSREIHE 1	152
	MESSUNGEN AN DEN PROBEN DER VERSUCHSREIHE 2	156
	ZWEITES ZWISCHENERGEBNIS	158
6.2.3	DER WIDERSTAND DES UNVERPRESSTEN PULVERS	160
6.3	MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES	164
6.3.1	STAMPFKONTAKTE MIT VERSILBERTEM KUPFERPULVER	164
6.3.2	STAMPFKONTAKTE MIT KUPFERPULVER	169
6.3.3	STAMPFKONTAKTE MIT EISENPULVER	170
6.3.4	ERGEBNISSE	172
6.3.4	ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNGEN	173
7.	DER STAMPFCONTROLLER	174
7.1	MOTIVATION	174
7.2	AUFGABEN	175
7.3	PROBLEME BEI DER NACHRÜSTUNG BESTEHENDER ANLAGEN	175
7.3.1	EINFLUSSGRÖßEN UND DEREN AUSWIRKUNGEN	175
7.3.2	MECHANISCHE VERSCHIEBUNG DER ABFRAGEZEITPUNKTE	176
7.3.3	PNEUMATISCHE VERSCHIEBUNG DER ABFRAGEZEITPUNKTE	180
7.3.4	KONSTRUKTIVE MAßNAHMEN	181
7.3.5	EINSTELLPUNKTE	181
7.4	WEITERE ANWENDUNGEN DER MIKROCONTROLLER PLATTFORM	183

7.4.1	LUFTIMPULSERZEUGUNG MIT EINEM VENTIL	183
7.4.2	VERSUCHSVARIANTEN	188
7.4.3	ZIELE EINES NEUEN KONZEPTES	190
7.5	ZUSAMMENFASSUNG	192
8.	ERKENNTNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	195
8.1	DIE HERSTELLUNG VON STAMPFKONTAKTEN	195
8.2	BEWEGUNGSABLÄUFE BEIM STAMPFEN	197
8.3	TECHNISCHE AUSRÜSTUNG DER FERTIGUNGSMASCHINEN	198
8.3.1	BESTEHENDENS STEUERUNGSKONZEPT	198
8.3.2	LEISTUNGSGRENZEN DES BESTEHENDEN STEUERUNGSKONZEPTES	199
8.3.3	ERWEITERTES STEUERUNGSKONZEPT	199
8.3.4	ZUKÜNFTIGE MÖGLICHKEITEN DER STEUERUNG	200
8.4	ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES	201
8.5	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES	202
8.5.1	ERGEBNISSE DER MATERIALUNTERSUCHUNGEN DES STAMPFPULVERS	203
	EINE BETRACHTUNG ZUR FESTIGKEIT	203
	VERLUST DER FESTIGKEIT BEI THERMISCHER BELASTUNG	204
8.5.2	ERGEBNISSE DER STAMPFVERSUCHE	204
8.6	ZUSAMMENFASSUNG	206
	ANHANG UND ERGÄNZENDE INFORMATIONEN	208
A	WEITERE MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS	208
A.1	STAMPFPULVER NR. 1 (EISENPULVER)	208
A.2	STAMPFPULVER NR. 6 (VERSILBERTES KUPFERPULVER)	210
A.3	STAMPFPULVER NR. 3 (KUPFERPULVER)	215
	ZUSAMMENFASSUNG	218
	EINE WEITERE BETRACHTUNG ZUR FESTIGKEIT	218
B	AUFGABEN DES STAMPFCONTROLLERS	220
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	224
	TABELLENVERZEICHNIS	228
	LITERATURVERZEICHNIS	230

1. EINLEITUNG

Bei elektrischen Maschinen werden zur Übertragung von elektrischer Energie auf bewegliche Kontakte, sogenannte Bürsten, verwendet. In der Anfangszeit des Elektromaschinenbaues wurden dazu bürstenartige Bündel dünner Kupferdrähte eingesetzt. Diese Drahtbüschel wurden später, der besseren Laufeigenschaften wegen, durch Materialien wie Graphit und Kohlematerialien verdrängt, der Name Bürste jedoch beibehalten.

Mit der Verbreitung elektrischer Generatoren und Motoren wuchs der Bedarf an Bauelementen zur Übertragung elektrischer Energie von oder zu rotierenden oder bewegten Maschinenteilen. Metallstücke als Schleifkontakte und Graphitstücke wurden zum Kontaktieren verwendet. In der Regel erfolgte dabei der Stromübergang nur über die Halterung der Bürste und Kontaktfedern. Auf Grund von Schwingungen und anderer mechanisch bedingter Phänomene konnte es dabei auch zu kurzzeitigen Beeinträchtigungen bei der Energieübertragung kommen. Eine Konsequenz war, den Unsicherheitsfaktor Kontaktübergang von der Energiezuführung zur Bürste durch die Verwendung von Kabelverbindungen sicherzustellen

In der Regel erfolgte bei den Kohlebürsten zunächst der Stromübergang nur über die Halterung der Bürste und Kontaktfedern. Um die Kontaktierung zu verbessern und damit die Übergangsverluste zu verkleinern, wurden die Kohlebürsten mit Kabelanschlüssen versehen. Zur Befestigung der Kabelanschlüsse an der Kohlebürste wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt.

Bei Kontakten mit Lötverbindung wurde in die Kohlebürste seitlich ein Loch gebohrt, ein Kabelende durchgesteckt, das freie Kabelende in einer verkupferten Vertiefung ausgespreizt und verlötet.

Bei Kontakten mit Schraubverbindung bzw. Nietverbindung wurde das Kabel an der Kohle direkt festgeklemmt. Dazu wird die Litze in eine Öse eingepresst und dort hart oder weich angelötet. Die Öse ist an einem Metallteil angebracht, der als Metallplatte oder Seitenplatte ausgeführt ist. Diese wird dann auf dem verkupferten Bürstenkopf angenietet oder angeschraubt. Ein Vorteil dieser Ausführung ist die geringe Bauhöhe. Diese Verbindungsart wird speziell bei Bürsten aus weichen Materialien verwendet. Ein Vorteil gegenüber anderen Befestigungsarten ist zudem, dass auch, bezogen auf die Abmessungen der Bürste, außergewöhnlich starke Querschnitte von Litzen befestigt werden können.

Benötigt werden derartige Kohlebürsten für Anwendungen, wo kurzzeitig sehr hohe Stromstärken übertragen werden müssen, wie beispielsweise bei Flugzeug-Anlassen.

Schraub- und Lötverbindungen sind normalerweise auf nur wenige Spezialfälle beschränkt.

Bei der Hohnieten-Verbindung presst eine Hohniete eine Litzenschlaufe unter Druck gegen einen verkupferten Sitz in eine Vertiefung der Kohle. Nietverbindungen sind besonders dort im Einsatz, wo Kohlebürsten im Betrieb großen Vibrationen ausgesetzt sind, bei hohen Betriebstemperaturen oder wenn die Abmessungen der Kohlebürste zu gering sind um das Anbringen einer Einstampf-Verbindung zuzulassen.

Die Nietverbindung kann auch dazu dienen, eine Metallkappe an die Bürste zu befestigen.

Die für die Herstellung von Kohlebürsten wichtigste Art der Verbindung ist der Stampfkontakt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit automatisierten Herstellungsprozessen von Stampfkontakten für Kohlebürsten.

Zunächst soll die Entwicklung von Fertigungsverfahren, die diesen zugrundeliegenden Konzepte und die wesentlichen Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die Qualität der Stampfkontakte betrachten werden. Hier werden sowohl elektrische Eigenschaften, wie geringe Übergangswiderstände, als auch bestimmte mechanische Eigenschaften, wie Festigkeit oder Lebensdauer, gefordert. In der Abbildung 1.1 sind Kohlebürsten gezeigt, wie sie in industriellen Anlagen Verwendung finden, wobei die Stampfkontakte¹ zur Veranschaulichung hier teilweise angeschliffen wurden.

Abbildung 1.1 zeigt den typischen Aufbau einer Kohlebürste. Man erkennt den Kontaktkörper, der aus einem Gemenge von elektrisch leitendem Graphit² und Zusatzstoffen besteht und an dem ein Kabel für die Stromzufuhr befestigt ist. Bei der Entwicklung einer Kohlebürste stehen die Eigenschaften der Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe im Mittelpunkt des Interesses.

¹ Unter Stampfkontakt wird die elektrische Verbindung der Kohlebürste mit dem Kabel definiert.

² Auf Grund des verwendeten Grundwerkstoffes, Kohlenstoff, spricht man von Kohlebürsten.



Abb. 1.1: Stampfkontakte, angeschliffen [Werkbild Schunk]

1.1 ENTWICKLUNG DER KOHLEBÜRSTENFERTIGUNG

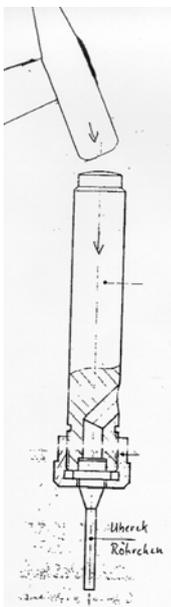


Abb. 1.2: Zeichnung eines Handwerkzeuges. Das Kabel wird seitlich eingefädelt, das Stampfrohr ist auswechselbar

Zunächst wurden diese Verbindungen rein manuell hergestellt. In vorgebohrte Kohlebürsten wurde das Kabel unter Zugabe von Kupferpulver mit einem stumpfen Werkzeug mit leichten Hammerschlägen eingestampft. Diese Art der Herstellung bedurfte, auf Grund der Materialeigenschaften der Grundmaterialien Kohle und verdrehte Kupferdrähte und der Anforderungen an die Verbindung Kohle-Kupfer, viel Gefühl beim Festklopfen dieser Verbindung. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass einerseits große Qualitätsunterschiede auch innerhalb der Chargen festzustellen waren, andererseits nur lange Zykluszeiten, beispielsweise im Maximum zwei Kohlebürsten bzw. Stampfkontakten pro Minute, hergestellt werden konnten. Abbildung 1.2 zeigt eine Schnittzeichnung eines Handwerkzeuges. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass so hergestellte Kohlebürsten in der Qualität der Ausführung große Unterschiede aufweisen.

Der Durchbruch zur industriellen Fertigung war die Entwicklung von Stampfmaschinen³. Auf Grund steigender Anforderungen sind auch die Stampfmaschinen einem Wandel unterworfen. Zunächst wurden Exzenterpressen verwendet, die über ein Gestänge und Federn, ausgelöst durch ein Fußpedal, schlagende Bewegungen erzeugen konnten und wobei über ein Rührchen mit einem Schieber Pulver per Fingerdruck dosiert wurde. Waren es in der Anfangszeit mehrere Einzelmaschinen, auf denen die aufeinander folgenden Fertigungsschritte durchgeführt wurden, so sind es heute Automaten, die eine Reihe dieser Fertigungsvorgänge nacheinander ausführen. Die ersten automatischen Stampfmaschinen wurden erst vor etwa 35 Jahren in den automatisierten Produktionsprozess aufgenommen. Heute⁴ werden im Dauerbetrieb 18 bis 20 Kohlebürsten mit einer Abschaltvorrichtung⁵ erzeugt. In Abbildung 1.3 ist ein bereits mit einer Exzenterpresse ausgerüsteter Arbeitsplatz für die händische Fertigung eines Stampfkontaktes zu sehen.

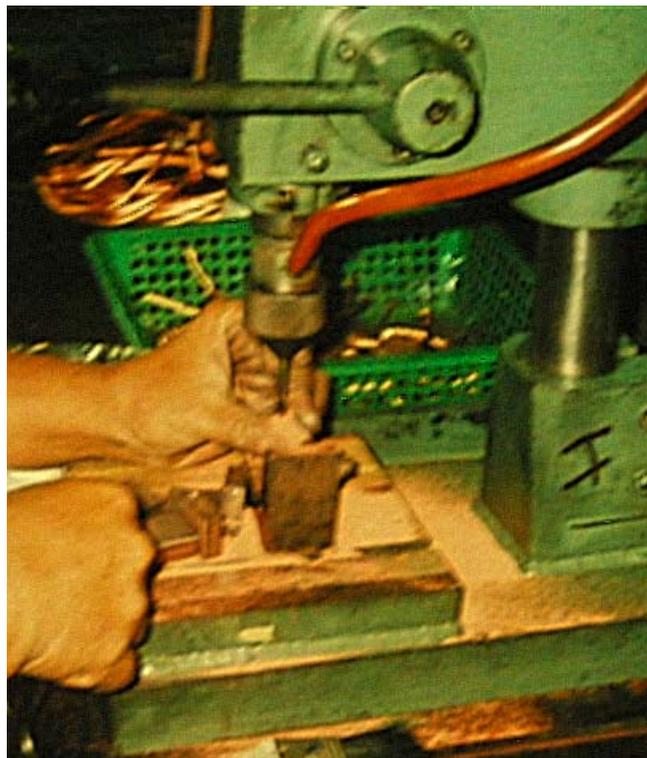


Abb. 1.3: Händische Fertigung eines Stampfkontaktes mit Pressvorrichtung [Werkbild Schunk]

³ Die Firma Schunk, Marktführer in Europa und bei speziellen Produkten sogar Weltmarktführer, erzeugt Kohlebürsten seit etwa 1923.

⁴ 2004

⁵ Eine Abschaltvorrichtung hebt die Kohlebürste bei Erreichen der Nutzungsgrenze durch Federdruck vom Kollektor ab und unterbricht damit die Stromzufuhr.

Abbildung⁶ 1.3 zeigt die in eine Klemmvorrichtung eingespannte Kohlebürste. Mit Hilfe einer Pressvorrichtung wird das Kabel eingeführt und festgestampft. Das Kupferpulver rieselt durch den seitlich geführten Schlauch in das Werkzeug und durch sein Eigengewicht weiter in die Bohrung.

1.2 KONZEPT DER AUTOMATISIERTEN KOHLEBÜRSTENFERTIGUNG

Das verwendete Verfahren des Einstampfens einer Kabelverbindung erfordert als minimales Konzept die Zuführeinrichtungen für die Bürste selbst, das benötigte Kabel und das Pulver, eine Bohreinheit, die Stampfvorrichtung und eine Entnahmestation für das fertige Produkt.

Ergänzend zur minimalen Ausrüstung der Maschine können noch weitere Bearbeitungsstationen, abhängig von der Ausführung der zu fertigenden Kohlebürsten, notwendig werden. Da üblicherweise für unterschiedliche Anwendungen auch verschiedene Typen von Kohlebürsten existieren, ist bei den meisten Fertigungseinrichtungen der Austausch von Werkstückhalterungen, Führungen und Werkzeugen vorgesehen, wodurch in der Regel ein Rüst- bzw. ein Einstellvorgang notwendig ist. Bei variablen Fertigungseinrichtungen werden fallweise sogar komplette Fertigungsstationen als Baugruppen in die Einrichtung mit aufgenommen oder entfernt.

Es existieren zwei Ansätze für diese Einrichtungen nebeneinander: relativ einfache Maschinen mit wenigen Bearbeitungsstationen und komplexere Maschinen mit vielen Bearbeitungsstationen.

Sind erstere sehr schnell von einer Type auf der andere umzustellen, dauert der Umstellungsvorgang für letztere schon erheblich länger, da mehrere Einzelmaschinen aufeinander abgestimmt werden müssen. Die Grundkonzeption wird in der Regel auf Basis von Rundtischmaschinen realisiert. In einer Einlaufstation wird die Kohlebürste mittels einer Klemmvorrichtung fixiert. In den folgenden Stationen wird die Bohrung zur Aufnahme des Kabels angefertigt und das Bohrloch nach dem Bohren gereinigt, danach erfolgt das Einfädeln des Kabels in das Bohrloch mit dem Stampfvorgang unter Zufuhr des Stampfpulvers, in einer weiteren Station wird die Oberfläche der fertigen Stampfung mit Lacken versiegelt und danach die fertige Kohlebürste ausgeworfen. Je nach Verwendungszweck der Kohlebürste können weitere Bearbeitungsschritte notwendig sein, wie zum Beispiel das Schleifen der Lauffläche, Markierungen wie Typenangaben durch Farbstempel-

⁶ Das Bild wurde im Jahr 2002 in einer kleinen Werkstätte in Thailand aufgenommen.

maschinen, der Einbau von Abschaltvorrichtungen sowie das Anschweißen eines Kabelschuhes oder Ankrampen eines Steckers an das Kabelende.

Grundsätzlich können Fertigungseinrichtungen nach verschiedenen Aufbaukonzepten angeordnet werden:

Reihenmaschinen, die manchmal sogar aus speziell für einen Arbeitsgang konstruierten Einzelmaschinen zusammengestellt sind. Der Transport der Kohlebürsten zwischen den Fertigungseinrichtungen erfolgt manuell, teilautomatisiert oder vollautomatisch.

Rundtischmaschinen, bei denen die für die Bearbeitungsschritte notwendigen Werkzeugmaschinen zentrisch angeordnet sind. Der Transport zwischen den Stationen erfolgt durch getaktetes Weiterdrehen eines Rundtellers.

Eine Voraussetzung zur Realisierung des Reihenmaschinen Konzeptes ist, dass die Form der Kohlebürsten das Schieben zulässt, beispielweise durch parallele, ebene Flächen an den Werkstücken. In den Abbildungen 1.4 und 1.5 sind die prinzipiellen Anordnungen der in Reihe geschalteten Einzelmaschinen dargestellt.

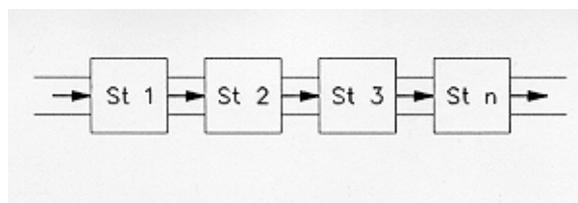


Abb. 1.4: Prinzip 1 der Reihenmaschine

Das in Abb. 1.4 gezeigte Prinzip 1 einer Reihenmaschine sieht einen Transport der Kohlebürsten derart vor, dass die Werkstücke unter oder neben den einzelnen Bearbeitungsstationen **kontinuierlich** vorbei **transportiert** werden. In der Regel wird dabei der ganze Strang der Kohlebürsten geschoben. Dieses Konzept wird beispielsweise bei Schleifstrassen angewendet, wobei n Schleifstationen⁷ die Rohkohle bearbeiten. Da die einzelne Kohlenbürste in der Regel in ihren Abmessungen sehr viel kleiner als die Bearbeitungsstation ist, werden bei diesem Konzept eine große Anzahl von Kohlebürsten zwischen zwei benachbarten Bearbeitungsstationen benötigt.

⁷ Je nach Anforderung werden bis zu 7 Schleifstationen zur Kalibrierung der Kohlestücke verwendet. Dabei werden die Rohkohlestücke auf vier Seiten in Breite und Höhe aus entsprechenden Rohkohlen zurechtgeschliffen. Zusätzlich können in einem Durchlauf auch noch die Kanten gebrochen werden. Die Länge wird in der Regel erst in den nachfolgenden Arbeitsschritten bearbeitet.

Da jede Kohlebürste in ihren Abmessungen gewisse Toleranzen zulässt und sich Toleranzen mehrerer, aufeinander folgender Kohlebürsten summieren, ist dieses Konzept für einen Bearbeitungsfolge an einer genau bestimmten Stelle der Kohlebürste weniger gut geeignet. Dennoch wurde auch dieses Konzept erfolgreich eingesetzt. Voraussetzung für das Funktionieren war die Einengung von Toleranzen bei den Abmessungen der Kohlebürsten, planparallele, zum Weiterschieben geeignete Formen und die Idee, die durch die Stampfmaschine zu bearbeitende Kohle beim Einführen des Werkzeuges nicht zu fest zu halten um den Vorgang des Einfädelns zu erleichtern bzw. zu ermöglichen.

Eine einfachere Handhabung und höhere Einstellsicherheit bietet der **getaktete Transport**. In Abbildung 1.5 ist das Prinzip dieser Anordnung dargestellt.

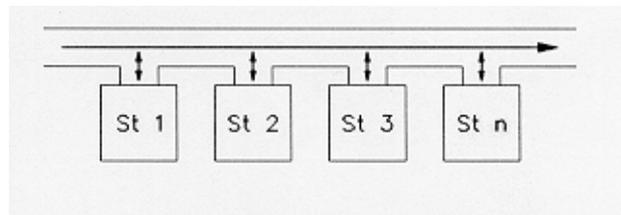


Abb. 1.5: Prinzip 2 der Reihenmaschine

Bei den in Abb. 1.5 dargestelltem Konzept wird aus einem getakteten Kohlestrang jeweils eine Kohlebürste entnommen, der Bearbeitungsstation zugeführt und nach Fertigstellung der Bearbeitungsschritte wieder in den Transportfluss eingereiht.

Eine Kombination der vorgestellten Konzepte ist bei den Radiusschleifgeräten verwirklicht. Der Transport erfolgt getaktet. Die erste Kohle wird dem Strang entnommen, geklemmt und die Lauffläche⁸ bearbeitet. In den weiteren Stationen kann beispielweise ein weiterer Schliff der Kohle auf der gegenüber liegenden Seite und die Markierung durch Einritzten oder Farbstempelung erfolgen. Als vorgeschaltete Maschine dienen sie bei einer Fertigungseinrichtung der Vorbereitung und als Zuführungseinrichtung für die Hauptbearbeitungsmaschine. Ähnlich ist der Aufbau von Abnahmestationen oder Nachbearbeitungsmaschinen, z.B. zur Montage von Kabelschuhen.

Ein anderes Konzept einer Reihenmaschine ist in Abb. 1.6 gezeigt. Hier werden die Kohlebürsten ebenfalls getaktet transportiert.

⁸ In der Regel mit Riefen versehen und für den Radius des Kollektors angeschliffen. Daher stammt der Name Radiusschleifgerät.

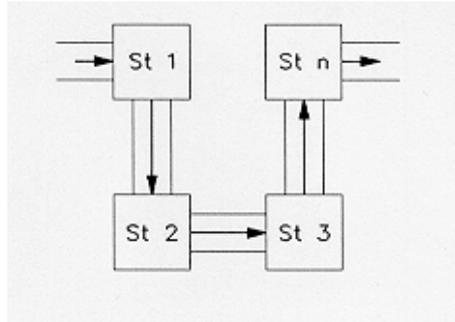


Abb. 1.6: Prinzip 3 der Reihenmaschine

Vorteil dieses Konzeptes ist, dass die Positionierung der zu bearbeitenden Kohlebürsten durch den Wegfall der Summe aufeinander folgender Toleranzen der Kohlebürsten mit größerer Genauigkeit⁹ erfolgen kann. So ist es möglich, auch voneinander abhängige Arbeitsschritte durchzuführen, wie z. B. das Bohren und anschließende Stampfen des Kabels. Die Forderung nach höherer Genauigkeit wird jedoch durch die Rundtischmaschinen besser erfüllt (Abbildung 1.7).

⁹ Der Grundkörper der Kohlebürsten wird durch Trennen und Schleifen auf anderen Fertigungseinrichtungen hergestellt. Die Abmessungen weisen, wie bei jedem Herstellungsprozess, gewisse Toleranzen auf. Nur bei konstanten Werten der Längenmaße einer Kohlebürste ist die Position einer einzelnen Kohle bei in einem Strang transportierter Kohlen wiederholgenau vorbestimmbar. Für die Bearbeitung, beispielsweise für das Einfädeln des Kabels in das Bohrloch, wird eine Genauigkeit besser als 0,1 mm Toleranz benötigt. Die Summierung von Toleranzen des Grundkörpers kann daher bereits über Erfolg oder Misserfolg bei der Fertigung des Stampfkontaktes entscheiden. In der geschichtlichen Entwicklung der automatisierten Fertigung gab es einen Zeitabschnitt, wo zur Umgehung der genannten Schwierigkeiten die Grundkörper der Kohlebürsten mit Nassschleifeinrichtungen hochgenau gefertigt worden sind, um überhaupt eine automatisierte Fertigung zu ermöglichen.

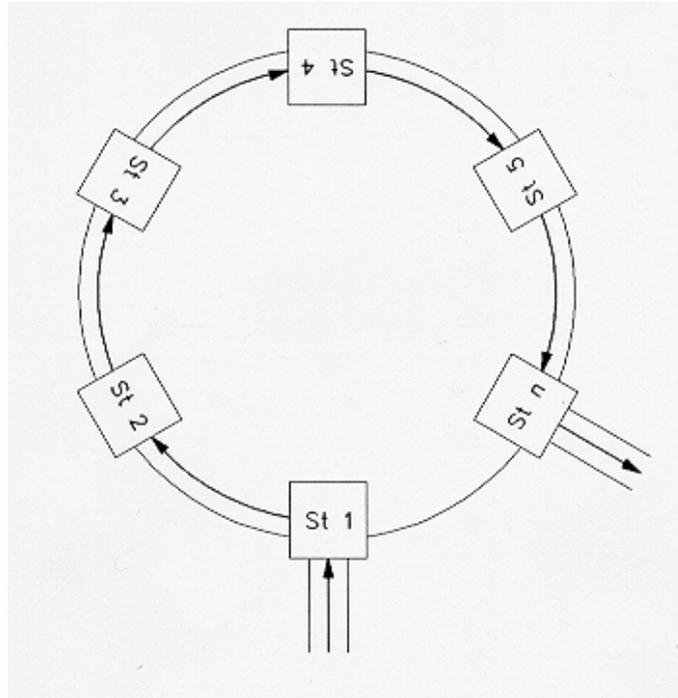


Abb. 1.7: Prinzip der Rundtischmaschine

Das in Abb. 1.7 gezeigte Prinzip der Rundtischmaschine zeichnet sich durch wiederholgenaue Positionierung der Werkstücke unter den Bearbeitungsstationen aus. Die Anzahl der Bearbeitungsstationen wird zentrisch angeordnet, der Transport erfolgt durch Takten des Tisches. Eine mögliche Bearbeitungsfolge bei sechs Stationen wäre Zulauf, Bohren, Reinigen des Bohrloches, Stampfen, Versiegelung des Stampfkontaktes und Auswerfen.

Zusammen mit Zuführeinrichtungen und Abnahmestationen für die (teil)fertigen Werkstücke existieren Mischformen der oben genannten Konzepte, wobei Vorbearbeitungsschritte und Nachbehandlung bzw. Weiterbearbeitung der Kohlebürsten außerhalb des Rundtisches erfolgen. Dieses Maschinenkonzept wird hauptsächlich für die vollautomatische Fertigung verwendet.

Die oben mehrfach erwähnte Genauigkeit aufeinander folgender Arbeitsschritte, ist von zentraler Bedeutung für den Fertigungsprozess. Insbesondere das zentrische Einführen des Kabels in das Bohrloch und die Parallelität von Bohrung und Führung des Stampfwerkzeuges sind wichtig, um den Stampfvorgang nicht zu beeinträchtigen. Später wird gezeigt, dass die umgesetzten Kräfte von der Schlagenergie abhängen und diese wiederum von der Geschwindigkeit des Stampfrohres beim Verdichtungsvorgang. Mögliche dämpfende Einflüsse durch Reibung verändern die Auftreffgeschwindigkeit und damit die Vorhersagbarkeit von Ergebnissen einer Stampfung.

In der Folge konzentriert sich das Interesse dieser Arbeit auf die für die Herstellung eines Stampfkontaktes benötigten Fertigungseinrichtungen und Vorgänge. Insbesondere interessieren jene Einstellparameter und Einstellmöglichkeiten an den Maschinen, die es ermöglichen, die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der fertigen Stampfkontakte zu beeinflussen und vorher zu bestimmen.

1.2.1 MECHANISCHE BAUGRUPPEN

Wie bereits oben angedeutet, werden die sequentiell aufeinander folgenden Arbeitsschritte von einzelnen Arbeitsstationen durchgeführt. Ursprünglich als Einzelmaschinen entwickelte Automaten, beispielsweise für das Bohren, Stampfen oder Lacken, wurden zu einer Gesamtfertigungseinrichtung vereinigt. Diese Arbeitsstationen wurden noch durch eine Zubringungseinrichtung und die Abnahmestation für die Kohlebürsten ergänzt.

Eine Zulaufstation dient dazu, die Kohlebürste in einer Klemmvorrichtung zu fixieren. Die Klemmvorrichtung selbst ist vergleichbar mit einem Schraubstock. Da die Kohlebürste an der Oberfläche nicht beschädigt werden darf, sind bei empfindlichen Bürsten die Klemmbacken des Schraubstockes sogar mit einem elastischen Material überzogen. Der Schraubstock ist so ausgebildet, dass er die Kohlebürste nicht nur festhält sondern auch mechanisch stützt.

In der Bohrstation wird die Bohrung zur Aufnahme des Kabels hergestellt. Speziell geformte Bohrer erlauben hohe Vorschubgeschwindigkeiten und sorgen für den Abtransport des ausgebohrten Kohlestaubs. Zusätzliche Blasdüsen und Absaugvorrichtungen unterstützen dies. In der Regel wird in einer zusätzlichen Reinigungsstation eine Nadel in das Bohrloch geführt und mit Luftimpulsen der restliche Kohlestaub ausgeblasen. Es existieren auch Maschinen, die in einem weiteren Bohrvorgang die Innenseite der Bohrung mit Hilfe eines Messers einritzen, um dem Stampfpulver einen besseren Halt zu ermöglichen.

In der Stampfstation wird das Kabel, das durch das Stampfrohr eingefädelt wird, in die Bohrung getaucht und gegebenenfalls das überstehende Kupferseil zu einem Knoten gestaucht. Wichtig dabei ist, die Maschine so einzustellen, dass das Stampfrohr an der Bohrungswand nicht streift, um ein Abbremsen durch Reibung zu verhindern. Dabei wird ein Trichter, der durch das Stampfrohr verschlossen ist, aufgesetzt. Der Trichter enthält das benötigte Stampfpulver. Zum Einführen des Kabels wird dieses geklemmt. Nach Lösen der Klemmung wird das Stampfrohr

oszillierend auf und ab bewegt, wobei die Öffnung des Pulvertrichters kurzzeitig freigegeben wird, so dass eine einstellbare Menge Pulver nachfließen kann. Dieses wird bei der folgenden Abwärtsbewegung schlagartig verdichtet. Nach Erreichen der gewünschten Füllhöhe wird das Werkzeug gehoben und danach das überstehende Kabel abgeschnitten.

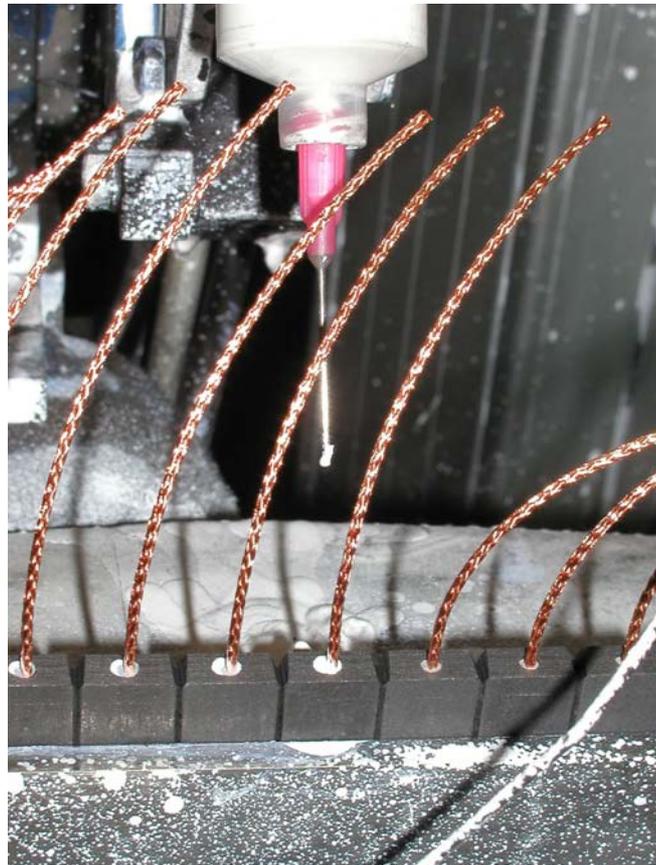


Abb. 1.8: Lackstation (lineare Förderung der Kohlen)

In der Lackstation (Abbildung 1.8) wird die Oberfläche der Stampfung mit einigen Tropfen einer Versiegelungsflüssigkeit benetzt. Dadurch wird die Stampfung zusätzlich verfestigt. In der nachfolgenden Auswurfstation wird die fertige Kohlebürste entweder in ein Magazin zur Weiterverarbeitung geschoben oder ausgeworfen. Zudem existieren auch Stationen, welche aus den gemessenen Parametern feststellen, ob die Qualität der Kohlebürste den Vorgaben entspricht oder ob sie als schlecht ausgeschieden werden muss. Damit kann eine Entscheidung für eine Sortiervorrichtung erzeugt werden.

1.2.2 DAS STEUERUNGSKONZEPT

Die ersten Stampfmaschinen waren relativ einfach aufgebaut. Daher genügte zur Realisierung der Funktionen auch eine verhältnismäßig einfache Relaissteuerung. Ab der Verwendung der Rundtische wurden zuerst Programmschaltwerke für die Ablaufsteuerungen, später elektronische Steuerungen eingesetzt. Der erste messbare Erfolg des Einsatzes elektronischer Steuerungen war eine Leistungssteigerung der Maschine durch Wegfall der typischen Anzugs- und Abfallverzögerungen der Relais. Die Bewegungsabläufe selbst wurden mit Hilfe von pneumatischen Zylindern gesteuert und von Endschaltern oder durch die Laufzeit kontrolliert. Mit zunehmender Komplexität der Maschinen durch erweiterte bzw. zusätzliche Funktionalitäten stiegen aber auch die Anforderungen an die Bedienung der Anlage und die Steuerung.

Während das Konzept der Verwendung pneumatischer Zylinder mit Endlagenüberwachung nur den Anforderungen entsprechend erweitert werden konnte, wurden bei den Antrieben zusätzlich Drehzahlregelungen beziehungsweise die Verstellmöglichkeit von Vorschubgeschwindigkeiten hinzugenommen. Der Komplexität der Steuerung wurde durch Verwendung von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) Rechnung getragen. Zur Erhöhung der Bedienfreundlichkeit wurden zunächst Textanzeigen für Fehlermeldungen eingeführt, später auch die Möglichkeit, einzelne Parameter über Bedienfelder oder Tastaturen einzugeben und zu verändern.

Die ersten Rundtische hatten einfache Steuerungen, wobei der Motor beim Vorwärtstakten jeweils für kurze Zeit ein- und ausgeschaltet wurde. Dabei wurde jeweils von einer Station in die nächste gewechselt. Spätere Rundtische besaßen bereits eine Kupplung und eine Bremse, wobei der Motor dauernd lief und der Tisch nur über Kupplung und Bremse gesteuert wurde. Die Funktionen wurden von speziellen Steuerkarten kontrolliert und mit der SPS erfolgte nur mehr ein Signalaustausch wie „Start“ oder „Fertig“. Fortgesetzt wird dieses Konzept durch den Einsatz von Rechnern zur Kontrolle der Funktionen und Frequenzumformen für die Regelung der Beschleunigungs- und Abbremsphase bei der Bewegung der Rundtische. Da während des Drehens die Kohlebürsten nicht bearbeitet werden können, bewirkt schnelleres Drehen eine Leistungssteigerung in der Fertigung.

1.3 DER STAMPFKOPF

Neben Vorrichtungen für das Zubringen und den Abtransport der Kohlebürsten sowie für das Anfertigen der notwendigen Bohrungen für das Kabel ist die Mon-

tageeinheit für die Befestigung des Kabels in dem Grundkörper der zentrale Bestandteil einer Fertigungseinrichtung für Kohlebürsten. In dieser Fertigungseinrichtung wird das Kabel unter Verwendung elektrisch leitender Pulver durch oszillierende Schlagbewegungen befestigt. Dieser Vorgang des Stampfens ist der Namensgeber der zugehörigen Einrichtung.

Die Aufgabe der Stampfeinheit ist das Einführen eines Kabels in die vorbereitete Bohrung und das Befestigen des Kabels. Durch die Hubbewegung des Stampfwerkzeuges rieselt eine adäquate Menge des Pulvers in die Bohrung und wird durch die Schlagenergie der Stampfbewegung verdichtet. Um die gewünschte Festigkeit zu erreichen, sind Pulvermenge, Schlagfrequenz und Schlagenergie einstellbar.

Die in Abbildung 1.9 gezeigte Stampfeinrichtung besteht aus einer Absenkvorrichtung für die Stampfeinheit, der Stampfeinheit und einer Schere für das Ablängen des Kabels. Das benötigte Kabel wird dabei von einer Kabeltrommel abgewickelt¹⁰ und zugeführt, das Stampfpulver rieselt durch sein Eigengewicht aus einem Vorratsbehälter in einen trichterförmigen Teller.

Die abgebildete Stampfeinrichtung ist auf einer Rundtischmaschine Baujahr um 1980 montiert. Auf der abgebildeten Maschine wurden bereits mehr als 70 Millionen Stampfkontakte hergestellt.

Im oberen Bilddrittel ist der ähnlich einer Glocke geformte Anschlag für die Hubbegrenzung des Stampfzylinders zu sehen. Dieser kann durch Verdrehen in der Höhe verstellt werden. Jener Teil, der eine Markierung (Punkt) zeigt, ist das Stampfwerkzeug (Stampfrohr). Die oberhalb des Stampfrohrs liegende Scheibe ist aus elastischem Material gefertigt, bildet den eigentlichen oberen Anschlag des Stampfzylinders, und dämpft die Bewegung nach oben. Mittels der Rändelschraube ist der Pulvertrichter für das Stampfpulver fixiert. Dieser Trichter ist auf einem Schlitten montiert und in der Höhe verstellbar. Die Pulverzufuhr in den oben abgedeckten Trichter ist teilweise durch den oberen Anschlag verdeckt und wird von einem größeren Vorratsbehälter versorgt¹¹.

¹⁰ Typisch wird die benötigte Kabellänge mit der Absenkbewegung nachgezogen. Es existiert dabei auch als Variante zur Verringerung der Zugspannungen angetriebene Abwickelvorrichtungen.

¹¹ Die Versorgung erfolgt über einen Kunststoffschlauch. Durch das Heben und Senken des Stampfkopfes rieselt die benötigte Menge Pulver nach.



Abb. 1.9: Stampfkopf [Werkbild Schunk]

Unterhalb des Trichters ist das Ende des Stampfrohrs mit dem Kabelende zu sehen. Auf dieser Maschine können Kohlebürsten mit zwei Kabelanschlüssen erzeugt werden. Im abgebildeten Fall werden jedoch zwei Kohlebürsten erzeugt, die in einer gemeinsamen Klemmvorrichtung festgehalten werden. Unter der Stampfstation sind zwei noch nicht gestampfte Bürsten zu sehen. In der folgenden Station ist die in der Abbildung gezeigte linke Kohlebürste bereits fertig gestampft. Die daneben festgehaltene Kohlebürste wird in einer, in dieser Abbildung teilweise verdeckten, weiteren Stampfstation bearbeitet.

Im unteren Bilddrittel ist außerdem die Spannvorrichtung für die Kohlebürsten, einschließlich einer radial wirkenden Klemmung, zu sehen. Der ebenfalls mit abgebildete Sensor detektiert das Vorhandensein des Kabels, wobei die Detektion während des Tischdrehens erfolgt.

1.4 BEANSPRUCHUNGEN DER KOHLEBÜRSTEN DURCH DEN FERTIGUNGSPROZESS

Das Grundmaterial der Kohlebürste wird aus pulverförmigen Materialien, wie Graphit und Zusatzstoffen, in Verfahrensanlagen hergestellt. Das Ergebnis dieses Fertigungsprozesses ist ein Kohleblock, der mittels Trennvorrichtungen in Rohlinge geteilt wird. Deren endgültige Form für die Weiterverarbeitung in der Stampfeinrichtung wird durch Schleifvorgänge erreicht. Gute Gleiteigenschaften einer Kohlebürste, also weiche Materialien, und deren mechanische Festigkeit stehen dabei zueinander im Widerspruch. Bei der Bearbeitung auftretende Kräfte können das fertige Produkt beschädigen und damit unbrauchbar machen. In der Folge werden die bei den Bearbeitungsschritten festgestellten Einflüsse und Fehlerquellen untersucht.

Ist in die zu bearbeitende Kohlebürste eine Bohrung angebracht, wird diese Kohle für das Stampfen bereitgestellt und fixiert. Im ersten Schritt wird das Kabel in die Bohrung eingeführt. Das zu befestigende Kabel ragt dabei etwas über das führende Stampfrohr hinaus und wird beim Auftreffen auf den Boden der Bohrung mechanisch gestaucht¹². Durch die dabei auftretenden Kräfte kann es zum Bruch oder zu Rissen in der Kohlebürste kommen.

Das bis zu diesem Zeitpunkt festgeklemmte Kabel wird durch Lösen der Klemmung freigegeben und das gleichzeitig als Kabelführung dienende Stampfrohr aus der Bohrung gezogen. Durch die Hubbewegung wird eine ringförmige

¹² Abhängig vom Kabelüberstand und der eingestellten Absenkhöhe wird ein Knoten gebildet. Es existieren aber auch Herstellungsvorschriften, bei denen kein Knoten gebildet wird.

Öffnung¹³ freigegeben und eine definierte Menge des Stampfpulvers rieselt in jenen Zwischenraum, der durch das Kabel und die Bohrung gebildet wird. Die Begrenzung der Pulvermenge erfolgt durch die Abwärtsbewegung des Stampfrohrs, welches mit seiner Abwärtsbewegung das Pulver mit der Schlagenergie verdichtet. Auch zu diesem Zeitpunkt kann es zu Beschädigungen der Kohlebürste kommen.

Der Vorgang des Füllens und Verdichtens wird einige Male wiederholt, bis die Bohrung gefüllt worden ist. Danach wird der Stampfkopf abgehoben und das Kabel in der gewünschten Länge abgeschnitten.

1.4.1 BEANSPRUCHUNGEN BEIM ABSSENKEN DES WERKZEUGES

Beim Einführen des Kabels in die Bohrung kann es, besonders bei genügend großer Auftreffgeschwindigkeit, zu Bruch oder Bildung von Rissen in der Kohlebürste kommen. Dies ist auf die von der Kohle zum Auftreffzeitpunkt aufzunehmende Energie zurückzuführen.

Als Fallbeispiel werden zur Abschätzung der Größenordnung einige aus der Praxis entnommene Werte für die folgende Betrachtung herangezogen. Für die umzusetzende kinetische Energie E_{kin} gilt allgemein:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J}] \quad (1.1)$$

Neben der Geschwindigkeit v zum Zeitpunkt des Aufsetzens ist die bewegte Masse m der Vorrichtung in Gl. (1.1) bestimmend für die kinetische Energie. Als Größenordnung für die kinetische Energie, die bei der Bearbeitung ein zerstörungsfreies Fertigen zulässt, wurde empirisch Werte in der Höhe von 20 mJ ermittelt¹⁴. Die bewegte Masse der Vorrichtung ist durch die Konstruktion vorgegeben und beträgt für die untersuchte Vorrichtung 8,2 kg.

¹³ Der Querschnitt entspricht ungefähr der Wanddicke des Stampfrohrs

¹⁴ Die Energie beim Stampfen hängt von den Materialeigenschaften ab. Hier wurde ein Wert gewählt, der typisch für sogenannte Kleinkohlen ist.

Durch Umstellung der Gl. (1.1) kann die maximale Aufsetzgeschwindigkeit abgeschätzt werden.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{8,2}} = 0,0698 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.2)$$

Das Ergebnis der Berechnung nach Gl. (1.2) zeigt also, dass die Aufsetzgeschwindigkeit im betrachteten Fall, als einzig möglicher veränderbarer Parameter, begrenzt werden muss.

1.4.2 BEANSPRUCHUNGEN BEIM STAMPFEN

Beim Stampfvorgang wird das Stampfpulver verdichtet, um einerseits die benötigte Ausreißfestigkeit sicherzustellen, andererseits einen möglichst kleinen elektrischen Übergangswiderstand zu erreichen. Die elektrischen Eigenschaften, insbesondere der erwähnte Übergangswiderstand, werden weiter unten diskutiert.

Unter Stampfen wird in der Folge die mechanische Krafteinwirkung auf das Stampfpulver verstanden. Eine kleine Masse¹⁵, typisch 191 g, wird oszillierend gehoben und wieder fallen gelassen, wobei Federn die Krafteinwirkung verstärken oder schwächen können. Die genauen Bedingungen, welche Federn wie einzusetzen sind, sind in Herstellungsvorschriften zusammengefasst, ebenso wie die benötigten Teilmengen des zu verdichtenden Pulvers.

Pulvermenge und Krafteinwirkung sind eng miteinander verknüpft. Kleinere Pulvermengen erfordern zum Verdichten einen geringeren Kraftaufwand und bedingen daher eine kleinere Beanspruchung der Bohrung. Obwohl die Hauptwirkung der Kraft senkrecht zu den Wandstärken der Kohlebürste wirkt, existieren durch die Neigung des Pulvers, seitlich auszuweichen, bzw. durch das Verformen des Materials Kraftkomponenten, die orthogonal zur Hauptwirkungsrichtung stehen und die Bohrung, die gleichzeitig die Matrize für die Verpressung darstellt, seitlich beanspruchen. Dieser Beanspruchung wirkt einerseits die Biegebruchfestigkeit des Kohlebürstenmaterials und andererseits die stützende Gegenkraft der Einspannvorrichtung des Werkstückes entgegen.

¹⁵ Einige Konstruktionsmerkmale des Stampfmechanismus, speziell die Lagerung der bewegten Masse, werden für die weiter unten vorgenommene Modellbildung zur Untersuchung der Einflussgrößen auf die Bewegungsabläufe diskutiert.

Für die weiteren Berechnungen wird die Formel nach Gleichung 1.1 weiter unten verwendet werden.

1.5 DER STAMPFVORGANG

Der Stampfvorgang wurde in Detailaspekten bereits angedeutet. Im Detail ist der gesamte Vorgang in der automatischen Betriebsart sequentiell und beginnt nach dem Bereitstellen der vorgebohrten, fixierte Kohlebürste mit dem Einfädeln des Kabels mit gleichzeitigem Aufsetzen des Pulvertrichters, danach wird die Kabelfixierung durch Öffnen einer Zange gelöst und der Füll- und Verdichtungsvorgang gestartet. Füllen und Verdichten wird nun solange wiederholt¹⁶, bis eine einstellbare Füllhöhe erreicht worden ist. Mit dem Erreichen der Füllhöhe wird das Werkzeug abgehoben und das Kabel abgelängt.

1.5.1 MATERIALEIGENSCHAFTEN DER KOHLEBÜRSTE

Materialeigenschaften des Basismaterials einer Kohlebürste sind durch die Verwendung der Grundmaterialien und vom Herstellungsprozess abhängig. Hauptbestandteile sind Kohlenstoff und Zuschlagstoffe. Für spezielle Kohlebürsten werden auch Metalle, wie z.B. Kupfer, zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften zugesetzt.

Im Zusammenhang mit der automatisierten Fertigung von Kohlebürsten interessieren neben den elektrischen die mechanischen Eigenschaften des Materials. Das fertige Produkt dient dazu, die elektrische Verbindung zwischen bewegten und festen Anschlüssen herzustellen. Der Energietransport über die Kohlebürste sollte möglichst verlustfrei erfolgen. Für die Verlustleistung P_v [W] gilt allgemein:

$$P_v = R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (1.3)$$

Der laut Gl. 1.3 für den Energietransport benötigter Strom I [A] ist durch die Anwendung vorgegeben, der elektrische Widerstand R [Ω] durch die Bauform und das Material der Kohlebürste. Um den elektrischen Widerstand zu beeinflussen, bleibt in der Regel als möglicher Ansatzpunkt nur die Auswahl geeigneter Materialien. So werden bei der Herstellung als Grundwerkstoffe beispielsweise Graphit in der Form von Plättchen verwendet, die sich beim Herstellungsschritt "Verpressen des Grundgemenges" ausrichten und damit eine verbesserte Leitfähigkeit in einer Vorzugsrichtung bewirken. Nachdem jedoch ein Gemenge immer

¹⁶ Füllhöhe, Pulvermenge und die Schlagenergie bestimmen diesen Vorgang.

Inhomogenitäten aufweist, kann die Eigenschaft einer bestimmten Leitfähigkeit nur innerhalb gewisser Grenzen bei der Herstellung reproduziert werden.

Der Widerstand bei den Materialübergängen zwischen Kabel und Kohlebürste bewirkt auf Grund des Stromes Verluste, die in Wärmeenergie umgesetzt werden. Auf Grund der unterschiedlichen Grundwerkstoffe mit ihren verschiedenen Wärmeausdehnungseigenschaften können bei genügend großer Energieumsetzung Kräfte erzeugt werden, durch welche die beim Stampfvorgang hergestellte Verbindungsstelle beeinträchtigt oder sogar zerstört werden kann.

In der Folge werden zunächst die elektrischen Eigenschaften der Kohlebürsten und des Stampfpulvers betrachtet und untersucht. Für die weiteren Untersuchungen benötigte mechanische Eigenschaften werden den Spezifikationen der Hersteller entnommen.

1.5.2 MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS

Stampfpulver werden in verschiedenen Zusammensetzungen verwendet. Hauptbestandteile sind, wegen der guten Leitfähigkeit, Kupferpulver mit dem Zusatz von Silber bzw., der hohen Festigkeit wegen, Eisenpulver. Es wird auch Graphit in Pulverform verwendet. Aufgabe des Pulvers ist, eine gute elektrische und mechanische Verbindung zwischen der Kohlebürste und dem Anschlusskabel herzustellen.

Bei der Herstellung des Stampfpulvers entstehen Pulverpartikel in einer bestimmten Korngrößenverteilung. Die Korngrößenverteilung wird mit Hilfe von feinen Sieben bestimmt. Auf Grund der Konstruktion der Verdichtungswerkzeuge wird jedoch eine typische Korngröße von etwa 250 Mikrometer mit einem möglichst geringen Feinanteil benötigt¹⁷.

Neben der Korngröße ist die Kornstruktur ein wichtiger Kennwert für das Stampfpulver. Wichtige Kornformen sind dendritische, wie z.B. Elektrolyt-Kupferpulver, sprazige, wie z.B. Bronzepulver, knollige, wie z.B. Bleipulver, und kugelige Pulver. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass abgerundete Kornformen ein besseres

¹⁷ Die Abstände zwischen Bohrung in der Kohlebürste und dem Stampfwerkzeug bzw. zwischen dem Stampfwerkzeug und dem innen geführten Kabel liegen bei typisch 100 Mikrometern. Die Körner des Stampfpulvers sollen so groß sein, dass diese sich beim Herstellungsprozess der Verdichtung nicht im Zwischenraum Kohlebürste-Stampfwerkzeug bzw. Stampfwerkzeug-Kabel verkeilen können. Dadurch sollen mögliche unkontrollierbare Reibungseinflüsse verhindert werden.

Fließverhalten zeigen als dentritische. Ebenso einleuchtend ist, dass die sogenannte Grünfestigkeit¹⁸ bei abgerundeten Kornformen niedriger sein wird als bei dentritischen Pulvern.

Betrachtet wird das Kollektiv aller Pulverteilchen bezüglich ihrer Fülldichte, Fließeigenschaft und Fließdauer, Grünfestigkeit, Verformbarkeit usw.. Kornform und Korngröße eines Pulvers sind Kenngrößen für seine spezifische Oberfläche. Eine große spezifische Oberfläche einer z.B. dentritischen Kornform ergeben bei gleicher Korngröße eine niedrigere Fülldichte. Theoretisch sind kleinere Korngrößen zur Erzielung höherer Fülldichten und gutes Fließvermögen durch abgerundete Kornformen wünschenswert, sind auf Grund der Möglichkeit des Verkeilen bzw. der geringeren Grünfestigkeit eher nicht als Lösung geeignet.

Als verbreitete Apparatur für die Bestimmung von Fülldichte und Fließdauer wird ein Trichter mit einer Auslauföffnung verwendet. Für die Fließdauer wird jene Zeit bestimmt, die eine bestimmte Menge (z.B. 50 g Pulver) benötigt, unter definierten Bedingungen aus dem Trichter auszufließen. Zur Bestimmung der Fülldichte wird ein Messgefäß auf definierte Weise durch aus dem Trichter auslaufendes Pulver befüllt und danach die Fülldichte in Masse/Volumen bestimmt. Ohne Zusatzvorschriften funktioniert dieses Verfahren nur bei frei fließenden Pulvern, sonst müssen Hilfen benutzt werden.

In der Regel sind Stampfpulver frei fließend. Dennoch existieren Überlegungen, die Fließeigenschaften durch Vibratoren oder Fluidisierung des Pulvers zu verbessern. Eine weitere Materialkonstante bei den Pulvern ist die zu erwartende Klopfdichte. Darunter wird das Verdichten des Pulvers vor der eigentlichen Verarbeitung z.B. durch den Transport beschrieben. Die Klopfdichte nimmt bei feinen Pulvern deutlich zu und bestimmt die für die Verarbeitung notwendigen Eigenschaften.

Zur Fließfähigkeit kann festgestellt werden, dass Kupferpulver und Kupferlegierungen im Allgemeinen frei fließen, Bleipulver oder Zinnpulver jedoch nicht. Für

¹⁸ Unter Grünfestigkeit versteht man hier die Festigkeit des verdichteten Pulvers nach einem Verarbeitungsprozess ohne zusätzliche weitere Behandlung. Interessant ist, dass dieser Begriff durchaus verschiedenen verwendet wird. In der Gießereitechnik beispielsweise gewährleistet die Grünfestigkeit den Zusammenhalt des Formstoffes beim Modellziehen und den nachfolgenden Manipulationen (Form wenden, Transport, Kerneinlegen, Zusammenbau). Beim anschließenden Gießen sichert sie sogar in der ersten Phase auch den notwendigen Widerstand gegen das einströmende Metall und ermöglicht so die Gusskörperbildung.

die Fließfähigkeit ist der Feinanteil eines Materials und sein Schüttwinkel¹⁹ entscheidend. Ein weiterer wesentlicher Einfluss ist der Feuchtigkeitsgehalt des Pulvers und des Trichters. Bereits geringe Feuchtigkeitsspuren beeinflussen Fließfähigkeit und Schüttwinkel stark.

Eine weitere wichtige Eigenschaft des Stampfpulvers ist seine Verpressbarkeit. Die erforderlichen Pressendrucke sind für die verschiedenen Materialien unterschiedlich, der mögliche Pressendruck beim Verdichten ist konstruktionsbedingt begrenzt. Der Pressendruck wird durch das Stampfwerkzeug mittels der Schlagbewegung erzeugt und bewirkt die Verdichtung des Stampfpulvers. Ein Maß für die Verdichtung ist die bereits mehrmals erwähnte Grünfestigkeit, die auch als Biegebruchfestigkeit oder radiale Bruchfestigkeit bezeichnet wird.

Um die Vorgänge beim Stampfvorgang in Bezug auf Festigkeit und Verpressbarkeit einordnen zu können, werden Pressversuche mit unterschiedlichen Stampfpulvern durchgeführt und die Versuchsergebnisse der Materialproben mit den erzielten Ergebnissen bei Stampfkontakten verglichen (siehe Kapitel 6).

Ergänzend sind weitere Materialeigenschaften des Stampfpulvers im Anhang A zusammengestellt.

1.5.3 DER ELEKTRISCHE WIDERSTAND VON WERKSTOFFEN

Der elektrische Widerstand von Werkstoffen wird durch die elektrische Leitfähigkeit beschrieben. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch die gerichtete Bewegung von Ladungsträgern (Ionen oder Elektronen) in einem Leiter bestimmt. Die Elektronenleitung beschreibt dabei den Leitungsmechanismus bei Metallen und Halbleitern. Der Ladungstransport erfolgt dabei über frei bewegliche Elektronen. Für die elektrische Leitfähigkeit σ gilt allgemein:

$$\sigma = \mu \cdot n \cdot q \quad [\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1.4)$$

mit n = Zahl der Ladungsträger pro Volumeneinheit, q = die pro Ladungsträger transportierte Ladung ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C) und μ = Beweglichkeit der Ladungsträger. Zwischen σ und dem elektrischen Widerstand besteht die Beziehung:

¹⁹ Der Schüttwinkel ist jener Winkel, ab dem das betrachtete Material zu fließen beginnt. Der Schüttwinkel ist stark von der Pulverform abhängig und beschreibt in der Regel einen Winkelbereich

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot A} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

mit dem spezifischen Widerstand (Resistivität) ρ [$\Omega^{-1}m^{-1}$], der Länge des betrachteten Leiters l [m] und dessen Querschnitt A [m²]. Für homogene Werkstoffe kann man aus Tabellen Werte für den spezifischen Widerstand entnehmen.

In der nachfolgenden Tabelle sind einige Werte zusammengestellt, die für die folgenden Betrachtungen herangezogen werden (Tab. 1.1)

Werkstoff	spez. Widerstand ρ_0 [$10^{-6}\Omega^{-1}m^{-1}$]	Temperaturkoeffizient β_0 [$10^{-3}K^{-1}$]
Eisen	0,0871	6,57
Kupfer	0,0155	4,33
Silber	0,015	4,1
Graphit	22,0	-1,3

Tab. 1.1: Materialwerte [Wal94]

Die Kohlebürste besteht im wesentlichen aus Graphit, dem zur Verbesserung der Leitungseigenschaft rezeptabhängig bis zu 30 % Kupfer zugesetzt sein kann. Im nachstehenden Beispiel werden die Zusatzwerkstoffe, wie z.B. Bindemittel, außer Betracht gelassen und angenommen, die Mischung der Ausgangswerkstoffe betrage zu 30 % aus reinem Kupfer und der Rest aus reinem Graphit. Damit können der maximale und der minimale Widerstand dieser Kohlebürste wie folgt abgeschätzt werden.

Typisch kann eine zufällige Verteilung für die Werkstoffe angenommen werden, etwa wie sie in Abbildung 1.10a schematisch dargestellt ist. Dabei seien die Begrenzungen die Anschlussflächen für ein in unserem Gedankenexperiment angeschlossenes Messinstrument und die grauen bzw. rot dargestellten Flächen aus dem Werkstoff Graphit bzw. aus Kupfer bestehende Teilchen.

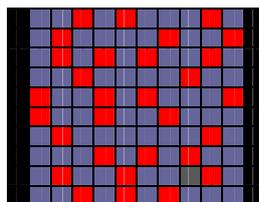


Abb. 1.10a: zufällig verteilte Werkstoffteilchen

Idealisiert wurde dabei angenommen, dass alle Teilchen gleich groß sind. Selbst unter dieser Annahme kann über den Widerstand ohne genaue Kenntnis der

Verteilung keine exakte Aussage gemacht werden, abgesehen vom Umstand möglicher Übergangswiderstände an den Grenzflächen und sonstigen isolierenden Einflüssen, wie beispielsweise Verunreinigungen und andere. In den Abbildungen 1.10b und 1.10c sind idealisiert Verteilungen für die Extrema gezeigt.

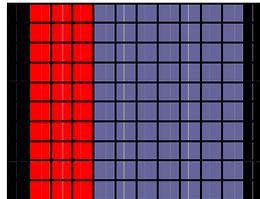


Abb. 1.10b: seriell verteilte Werkstoffteilchen

Angenommen, die Ausgangsmaterialien seien homogen und seien in Reihe geschaltet, ähnlich der in Abbildung 1.10b dargestellten seriellen Verteilung der Werkstoffteilchen. Dann ist der Gesamtwiderstand die Summe der Einzelwiderstände

$$R_{ges} = R_{Gr} + R_{Cu} \quad (1.6)$$

und zusammen mit der Formel 1.5

$$R_{ges} = \frac{\rho_{Gr} \cdot l_{Gr}}{A_{Gr}} + \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{Cu}}{A_{Cu}} \quad (1.7)$$

Vereinfachend wird weiters angenommen, der Querschnitt des so entstehenden Leiters sei konstant. Dann gilt entsprechend der angenommenen Zusammensetzung, dass die Länge der Kupferleitung 30 % der gesamten Länge entspricht. Setzt man die Materialwerte aus Tabelle 1.1 in die Formel 1.7 ein, folgt

$$R_{ges} = \frac{\rho_{Gr} \cdot 0,7 \cdot l}{A} + \frac{\rho_{Cu} \cdot 0,3 \cdot l}{A} = \frac{l \cdot (0,7 \cdot \rho_{Gr} + 0,3 \cdot \rho_{Cu})}{A} \quad (1.8)$$

Durch Vergleich mit Formel 1.5 und den Zahlenwerten aus der Tabelle 1.1 errechnet sich der Wert für den spezifischen Widerstand der Kohlebürste bei Serienschaltung der Werkstoffe zu

$$\rho_{ges} = (0,7 \cdot \rho_{Gr} + 0,3 \cdot \rho_{Cu}) = 15,40775 [10^{-6} \cdot \Omega^{-1} \cdot m^{-1}] \quad (1.9)$$

Andererseits könnten die Ausgangsmaterialien, wie in Abbildung 1.10c gezeigt, auch parallel geschaltet sein.

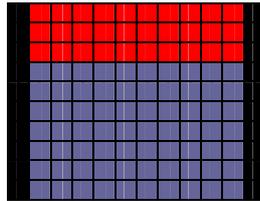


Abb. 1.10c: parallel verteilte Werkstoffteilchen

Für eine Parallelschaltung gilt allgemein

$$R_{ges} = \frac{R_{Cu} \cdot R_{Gr}}{R_{Cu} + R_{Gr}} \quad (1.10)$$

Entsprechend der Parallelschaltung kann angenommen werden, dass bei gleicher Länge der Leiter sich die Querschnitte der Leiter im zu Grunde gelegten Mischungsverhältnis teilen. Zusammen mit Gleichung 1.5 folgt nach kurzer Zwischenrechnung

$$R_{ges} = \frac{\frac{\rho_{Gr} \cdot l_{Gr}}{A_{Gr}} \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{Cu}}{A_{Cu}}}{\frac{\rho_{Gr} \cdot l_{Gr}}{A_{Gr}} + \frac{\rho_{Cu} \cdot l_{Cu}}{A_{Cu}}} = \frac{\frac{\rho_{Gr} \cdot \rho_{Cu} \cdot l^2}{0,7 \cdot 0,3 \cdot A^2}}{\frac{0,3 \cdot \rho_{Gr} \cdot l + 0,7 \cdot \rho_{Cu} \cdot l}{0,7 \cdot 0,3 \cdot A}} = \frac{\rho_{Gr} \cdot \rho_{Cu}}{(0,3 \cdot \rho_{Gr} + 0,7 \cdot \rho_{Cu})} \cdot \frac{l}{A} \quad (1.11)$$

Durch Einsetzen der Werte aus Tabelle 1.1 und Vergleich mit Formel 1.5 folgt daraus der Wert für den spezifischen Widerstand der Kohlebürste mit

$$\rho_{ges} = \frac{\rho_{Gr} \cdot \rho_{Cu}}{(0,3 \cdot \rho_{Gr} + 0,7 \cdot \rho_{Cu})} = \frac{0,341}{6,61085} = 0,0515818 \text{ [} 10^{-6} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \text{]} \quad (1.12)$$

Die entsprechend dem obigen Beispiel verwendeten Grundwerkstoffe sind nur selten in einer Kohlebürste homogen verteilt. Je nach Art der Herstellung einer inhomogenen Mischung aus Kupfer und Graphit können daher stark variierende Widerstandswerte erwartet werden²⁰. Derartige Streuungen von Eigenschaften eines Produkts sind für die technischen Anwendungen nicht brauchbar und daher auch nicht zulässig. Durch Wahl der Korngrößen der Ausgangswerkstoffe und durch deren gute Durchmischung beim Herstellungsprozess können die Toleranzen einerseits eingengt werden, andererseits durch beispielsweise Verwendung von Graphit in Blättchenform Werkstoffe mit bestimmten, auch richtungsabhängigen, Eigenschaften erzeugt werden. Die rein rechnerische Vorbestimmung von bestimmten Werten ist nur beschränkt möglich.

²⁰ Die Unterschiede im Wertebereich können in der Größenordnung bis ca. 10³ liegen.

1.5.4 ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS

Während die elektrischen Eigenschaften beim Herstellungsprozess durch Maßnahmen wie die Form der verwendeten Grundwerkstoffe²¹ beeinflusst werden können, muss das sogenannte Stampfpulver in bestimmten Korngrößen mit relativ eng gesetzten Toleranzen vorhanden sein. Ähnlich dem Grundkörper der Kohlebürste lassen sich Abschätzungen über das elektrische Verhalten des Pulvergemenges anstellen. Wie bei der Kohlebürste existieren auch beim Stampfpulver verschiedene Pulvermischungen, wobei je nach Mischung Eisen, Kupfer, Silber, Graphit und weitere Zusätze verwendet werden. Zur Ermittlung der elektrischen Leitfähigkeit des verpressten Pulvers kommt noch der Grad der Verpressung bestimmend hinzu.

Untersucht werden im folgenden typische, in der industriellen Fertigung verwendete Stampfpulver. Daraus werden durch Verpressen des Pulvers Prüflinge auf Pressen hergestellt. Diese Proben werden mit unterschiedlichen Drücken erzeugt um danach ihre elektrischen Eigenschaften feststellen zu können (siehe Kapitel 5).

1.5.5 DER VERDICHTUNGSVORGANG DES STAMPFPULVERS

Verpresst man Pulver zu kompakten Formstücken in einer Presse, so kann der Pressdruck in Abhängigkeit von der Festigkeit der Matrize in weiten Bereichen variiert werden. Hohe Pressdrücke vermindern die kaum vermeidbare Restporosität. Ebenfalls nicht vermeidbar sind Verunreinigungen, die bereits in der Herstellungsphase des Pulvers und später beim Verarbeitungsprozess eingebracht werden. Während man Verunreinigungen durch Anforderungen an die Qualität beim Herstellungs- und Verarbeitungsprozess begegnen kann, ist die Erhöhung des Pressdruckes durch die Matrize, hier als Bohrung in der Kohlebürste, auf Grund der Materialeigenschaften des Grundmaterials begrenzt. Technisch gesehen erfolgt durch die Verdichtung eine plastische Umformung und ein Verschieben der Stoffteilchen, wobei die Masse unverändert bleibt.

Man kann den Umformungsgrad φ als logarithmisches Formänderungsverhältnis angeben. Betrachtet wird das Verhältnis von Anfangszustand zu Endzustand. Es gilt:

²¹ Es werden z.B. Graphit in Blättchenform verwendet, um bestimmte Leitungseigenschaften zu erzielen.

$$\varphi = \frac{\text{Endzustand}}{\text{Anfangszustand}} \quad (1.13)$$

und zusammen mit Gl. 1.13 folgen der Umformungsgrad für Höhe, Breite und Länge (Gl. 1.14):

$$\varphi_h = \ln \frac{h_1}{h_0} ; \varphi_b = \ln \frac{b_1}{b_0} ; \varphi_l = \ln \frac{l_1}{l_0} \quad (1.14)$$

Auf Grund der festen Abmessungen der Matrize interessiert im betrachteten Fall nur die Veränderung der Höhe. Für diesen Fall kann die auf die Höhe bezogene prozentuelle Formänderung ε_h wie folgt angegeben werden (Gl. 1.15):

$$\varepsilon_h = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \cdot 100\% \quad (1.15)$$

Für die im betrachteten Fall eingesetzte Kaltumformung ist der Umformungsgrad φ ausschlaggebend. Als Vorteile der Kaltumformung sind hier der geringe Einfluss der Umformgeschwindigkeit und die Festigkeitssteigerung der Verbindung hervorzuheben. Für die Umformungsarbeit kann durch Einführung des mittleren Umformwiderstandes k_m die Umformarbeit²² angegeben werden mit:

$$W = V \cdot \varphi_h \cdot k_m \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad (1.16)$$

In der Folge soll überlegt werden, ob die angegebene Gleichung 1.16 für die weitere Berechnung zugrunde gelegt werden darf. Bei Umformungsprozessen homogener Werkstoffe wird vorausgesetzt, dass das Volumen des umgeformten Materials konstant bleibt. Grundsätzlich gilt die Volumenkonstanz auch für den untersuchten Fall, wenn man den Feststoffanteil zugrunde legt. Der untersuchte Werkstoff ist jedoch keinesfalls homogen, sondern kann als hochgradig porös bezeichnet werden. Ein Teil der aufzuwendenden Arbeit wird daher für das Verdrängen der das Pulver umgebenden Atmosphäre benötigt und erst der verbleibende Rest wird in Umformarbeit umgesetzt. Der dämpfende Einfluss der Luftverdrängung darf in den weiteren Betrachtungen außer acht gelassen werden, weil bezüglich der beim Umformvorgang auftretender Kräfte nur jene obere Schranke interessiert, die das zerstörungsfreie Bearbeiten der Kohlebürste ermöglicht. Als Umformungswiderstand ist jene Kraft pro Flächeneinheit zu verstehen, die benötigt wird, das Pulver zusammenzupressen.

Der Bewegungsablauf beim Verdichten des Pulvers während des Stampfvorganges zeigt, dass das Pulver durch das Stampfwerkzeug nicht wie bei einer

²² Arbeit und Energie gehören der gleichen Größenart an. Arbeit und Energie ergeben sich als Wegintegral über der Kraft. Dieser Umstand erlaubt es, über die interessierenden Kräfte Aussagen zu machen.

Presse langsam, sondern schlagartig verdichtet wird. Der Kraftstoß oder Impuls²³ ist gleich dem Integral der Kraft über der Zeit. Das Ergebnis dieser Berechnung repräsentiert den Bewegungszustand vor bzw. nach dem Kraftstoß. In der folgenden Formel werden die Zeitpunkte vor dem Kraftstoß mit t_0 und danach mit t_1 bezeichnet. Es gilt also allgemein:

$$\int_{t_0}^{t_1} F \cdot dt = \int_{t_0}^{t_1} \frac{d(m \cdot v)}{dt} \cdot dt = m \cdot v_{t_1} - m \cdot v_{t_0} \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N} \cdot \text{s}] \quad (1.17)$$

Vergleichend wird das Stampfpulver in Versuchen mit einer Presse verpresst bzw. dem Stampfvorgang unterworfen. Die so entstandenen Proben werden unter dem Mikroskop verglichen und optisch als gleichwertig erkannte Probenbilder mit Hilfe der in den Gleichungen 1.1, 1.16 und 1.17 vorgestellten Formeln zur Abschätzung der Kräfteverhältnisse herangezogen.

1.5.6 ZEITLICHER ABLAUF

Mehrfach erwähnt wurde, dass das Verdichten des Stampfpulvers schlagartig erfolgt. Eine kleine Masse wird mittels Druckluft angehoben und verdrängt nach dem Umschalten des Ventils den Luftpolster, der im Zylinder aufgebaut worden ist, durch sein Eigengewicht und fällt so auf das lose geschüttelte Pulver.

Die Fallhöhe beträgt abhängig von der Füllhöhe des Bohrlochs einige Millimeter und wird durch Einstellungsmöglichkeiten an der Vorrichtung begrenzt. Für die Mechanik eines Massepunktes gilt für den zurückgelegten Weg $s(t)$ bei einer Bewegung aus der Ruhelage allgemein:

$$s(t) = \frac{a \cdot t^2}{2} \text{ [m]} \quad (1.18)$$

mit a der Beschleunigung und t der verstrichenen Zeit. Für eine Fallhöhe von typisch 10 mm kann aus Gl. 1.18 die Zeit des freien Falls²⁴ ermittelt werden zu:

$$10 \cdot 10^{-3} = \frac{9,80665 \cdot t^2}{2} \Leftrightarrow t = \sqrt{\frac{2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{9,80665}} \approx 45,2 \cdot 10^{-3} \text{ [s]} \quad (1.19)$$

Differenziert man die Gleichung 1.18 erhält man eine Formel für die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t . Es gilt allgemein:

²³ Manche Autoren unterscheiden zwischen Kraftstoß und Impuls.

²⁴ Im Vakuum, also ohne Luftwiderstand, mit der Norm-Schwerebeschleunigung $g = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (g Erdbeschleunigung) und unter der Annahme, dass das Bohrloch noch nicht gefüllt worden ist. Mit jeder Füllung verringert sich die Fallhöhe.

$$\frac{\partial}{\partial t}(s(t)) = v(t) = a \cdot t \quad [\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (1.20)$$

und mit der vorher berechneten Zeit folgt

$$v(t = 45,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}) = 9,80665 \cdot 45,2 \cdot 10^{-3} \approx 443,3 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}] \quad (1.21)$$

Der in Gl. 1.19 berechnete Wert ist die theoretisch maximal erzielbare Fallgeschwindigkeit. Zusammen mit der Formel aus Gl. 1.1 ergibt sich für die kinetische Energie zusammen mit den ermittelten Werten:

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{191 \cdot 10^{-3} \cdot 443,3^2 \cdot 10^{-6}}{2} \approx 0,0188 \quad [\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}] \quad (1.22)$$

Der in Gl. 1.20 errechnete Wert entspricht, abgesehen von den Rundungsfehlern, dem Wert der potentiellen Energie, die durch den freien Fall in Bewegungsenergie umgewandelt worden ist (Gl. 1.21).

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h = 191 \cdot 10^{-3} \cdot 9,80665 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \approx 0,0187 \quad [\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}] \quad (1.23)$$

Bedingt durch den Luftpolster und durch Reibung ist die an der Maschine gemessene Geschwindigkeit deutlich geringer, als die unter idealen Bedingungen erzielbare. Messungen haben gezeigt, dass mit der Masse von 191 g eine Geschwindigkeit von $237 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ erreicht wird, also etwa die Hälfte des möglichen Wertes.

Der Hub wird mittels Druckluft gesteuert. Der Druck ist definiert als jene Kraft, die auf eine Fläche wirkt. Als Einheiten gelten:

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa mit } 10^5 \cdot \text{Pa} = 1 \text{ bar} \quad (1.24)$$

Der typische Druck für die Bewegung des Stampfzylinders liegt bei 2 bar. Zur Abschätzung der im Zylinder wirkenden Kraft werden als Außendurchmesser des Kolbens 30 mm, als Innendurchmesser des Kolbens 16 mm zugrunde gelegt²⁵. Damit lässt sich die wirksame Kolbenfläche errechnen zu

$$A = \frac{(30-16)^2 \cdot \pi}{4} = 153,939 \quad [\text{mm}^2] \quad (1.25)$$

die Kraftwirkung F_h auf die Kolbenfläche ergibt sich damit zu

²⁵ Es gibt verschiedene Ausführungen der Stampfzylinder. Speziell für dünnere Kabel existieren Ausführungen mit geringerer Masse und anderen Abmessungen. Für obige Betrachtung wurden Abmessungen einer Standardausführung gewählt.

$$F_h = p \cdot A = 2 \cdot 10^5 \cdot 153,938 \cdot 10^{-6} = 30,7876 \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.26)$$

Dieser Hubkraft wirkt im betrachteten Fall nur die Schwerkraft entgegen. Bei einer Masse des Stampfzylinders von 191 g folgt

$$F_g = m \cdot g = 191 \cdot 10^{-3} \cdot 9,80665 \approx 1,873 \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.27)$$

und die resultierende Kraft mit

$$F = F_h - F_g = 30,7876 - 1,873 \approx 28,9 \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (1.28)$$

Dieser Kraft entspricht bei der gegebenen Masse und Hubhöhe einem Hilfswert a , der durch folgende Beziehung angegeben werden kann

$$28,9 \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}] = 191 \cdot 10^{-3} \text{ [kg]} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ [m]} \cdot a \text{ [s}^{-2}] \quad (1.29)$$

und aus dem sich durch Umstellen der Gleichung die Zeit t für die Hubbewegung errechnen lässt zu

$$t = \sqrt{\frac{191 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{28,9}} \approx 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ [s]} \quad (1.30)$$

Diese Zeit wird durch maschinenbedingte Einflüsse erhöht, wie beispielsweise die bremsende Wirkung durch Reibungskräfte, die strömungsbedingt langsam einsetzende Befüllung des Zylinders mit Druckluft, Verzögerungen auf Grund der Öffnungszeit oder des Öffnungsverhaltens des Ventils sowie der leitungsbedingte Strömungsverlust.

1.6 DER DREHSCHIEBER

Die Hilfsenergie zur Erzeugung der Anregungsimpulse für das Stampfrohr ist Druckluft, die durch ein rotierendes Ventil erzeugt wird. Die Luftimpulse werden in Abhängigkeit von der Umdrehungsgeschwindigkeit in den Hubzylinder der Stampfvorrichtung zur Belüftung geleitet. Durch Verdrehen der Luftkanäle wird dieser vom Versorgungsdruck getrennt und der Zylinder kann entlüftet werden. Der Drehschieber enthält Ausfräsungen, die durch die Drehbewegung Luftkanäle für Be- und Entlüftung freigibt bzw. sperrt. Wir werden den Drehschieber später noch genau untersuchen.

Da der Drehschieber ständig gedreht wird, ist zusätzlich ein Absperrventil in Reihe geschaltet, das die Versorgungsluft für den Drehschieber zum Zeitpunkt des Stampfens freigibt und nach Beendigung des Vorganges wieder sperrt.

In der ursprünglichen Ausführung der Stampfmaschinen war die Stellung des Drehschiebers nicht überwacht und daher auch nicht bekannt, so dass es

vorkommen konnte, dass zu Beginn des Stampfvorganges der Stampfzylinder nur unzureichend belüftet und damit nur ein unvollständiger Schlag erfolgen konnte und so eine zu geringe bis gar keine Pulvermenge gefördert worden ist. Dieser Umstand hat wiederum bewirkt, dass die Befüllung des Bohrloches unterschiedlich hoch erfolgte, mit der Konsequenz ungleichmäßiger gestampfter Kohlebürsten und Streuungen in der Qualität.

1.7 DAS STAMPFNIVEAU

Nach einer genügend großen Anzahl von Schlägen ist das Bohrloch gefüllt und der Stampfvorgang kann abgebrochen werden. Die zu erreichende Höhe wird als Stampfniveau bezeichnet. Wird diese Höhe nicht erreicht, also zu früh abgebrochen, bedeutet das üblicherweise eine zu geringe Festigkeit. Wird zu lange gestampft, tragen die überzähligen Schläge nicht zur Steigerung der Festigkeit bei.

Für die Höhenüberwachung wird nach wie vor standardmäßig ein mechanischer Endschalter verwendet. Dabei hat sich herausgestellt, dass es nur wenige Fabrikate gibt, welche die Anforderungen an Schaltgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit erfüllen. Zusätzlich musste der Umstand berücksichtigt werden, dass die mechanische Lebensdauer des Schalters begrenzt ist. Nimmt man an, dass ein mechanischer Schalter einige Millionen Schaltungen verträgt, und berücksichtigt eine durchschnittliche Anzahl in der Größenordnung von zehn Schlägen je Stampfkontakt sowie eine Maschinenproduktivität von etwa 8.500 Kohlebürsten pro Schicht, kann man sich leicht ausrechnen, dass der Schalter für das Niveau in relativ kurzen Zeitabschnitten ausgetauscht werden muss. In der Praxis hat sich herausgestellt, dass diese Zeiträume im Bereich von zwei Wochen bis zu drei Monaten liegen. Einige Jahre zurückliegende Versuche, bei denen die Tauglichkeit elektronischer Näherungsschalter untersucht worden ist, sind seinerzeit auf Grund des Schalterverhaltens dieser gescheitert (Hysterese).

Ein weiteres Problem ist der Umstand, dass das zu erreichende Niveau etwa in der Mitte des Hubes der Stampfspindel liegt und der Schalter daher bei jeder Hubbewegung „überfahren“ wird. Darüber hinaus muss die Höhe entsprechend der Vorgaben der Kohlen verstellbar sein. Die Lösung dieses Problems ist eine Wippe, die vom Stampfrohr geführt wird und den Schalter betätigt.

Mittels einer Rändelschraube kann der Schalter in der Höhe verstellt und damit die gewünschte Füllhöhe eingestellt werden. Spannfedern drücken die Halterung für den Schalter gegen die Schraube.

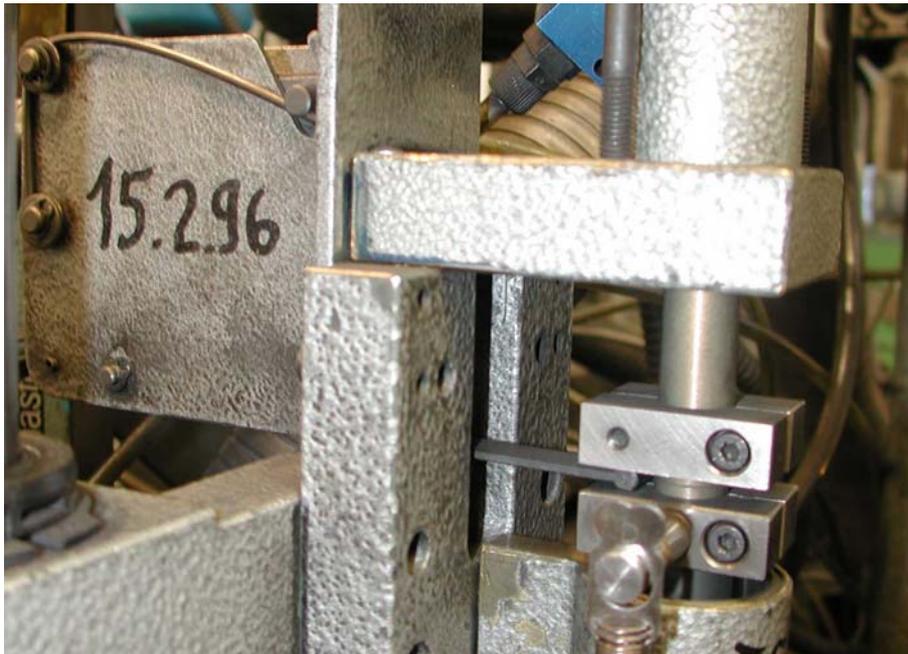


Abb. 1.11: Niveauschalter

Abb. 1.11 zeigt den Niveauschalter. Der Betätigungshebel wurde zwischen den beiden Blöcken eingespannt und zwangsgeführt. Am unteren Block sind die Halterungen zum Einhängen der fallweise benötigten Zugfedern für die Verstärkung der Schlagkraft zu sehen. Der Schalter ist um eine Achse drehbar gelagert und wird durch den Bügel aus Stahldraht nach oben gegen die in diesem Bild verdeckte Rändelschraube für die Höhenverstellung gedrückt. Als Schalter wird ein Mikroschalter mit einem Sprungkontakt verwendet, um die Wiederholgenauigkeit der Höhenabschaltung zu garantieren.

In diesem Fall erfolgt die Auswertung der Niveauabfrage selbst über eine Zeitfunktion. Bei den Einzel-Stampfmaschinen aber auch bei den ersten Rundtischautomaten wurden, um eine möglichst genaue Zeitfunktion zu erreichen, speziell für diesen Anwendungsfall konstruierte Zeitrelais eingesetzt. Universalzeitrelais waren auf Grund zu geringer Wiederholgenauigkeit nicht verwendbar. Mit der Einführung speicherprogrammierbarer Steuerungen ist die Genauigkeit bei den Einzelmaschinen kein Problem mehr. Aufgrund der eher geringen Komplexität der Steuerungsaufgabe²⁶ spielt die Zykluszeit dort nur eine untergeordnete Rolle. Bei

²⁶ Eingeführt wurden SPS bei derartigen Maschinen um das Jahr 1975. Die ersten SPS benötigten für über logische Verknüpfungen hinausgehende Sonderfunktionen eigene Karten, z.B. für die Zeit- oder Zählfunktion. Spätere Generationen von Steuerungen erzeugten für die Zeitfunktion einen internen Takt, der gezählt wurde. In diesem Fall lag der maximale Zeitfehler in der Größenordnung der Zykluszeit für einen Programmdurchlauf.

größeren Maschinen, speziell bei komplexeren Automaten war es, abhängig von der verwendeten Steuerungstypen, fallweise dennoch notwendig externe Zeitfunktionen mittels Zeitrelais zu realisieren oder, wenn möglich, sich mit Interrupts und deren Verarbeitung zu helfen.

2. AUFGABENSTELLUNG

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, eine elektrische Verbindung vom Kommutator zu den Anschlusspunkten für die Energieversorgung herzustellen. Zunächst waren es nur federnde Anschlussstücke, die für die Stromübertragung zur Kohlebürste verwendet wurden. Die Verbindung mit Litzenanschlüssen wurde in verschiedenen Varianten vorgenommen.

Die sogenannte Battersea-Verbindung wurde von der Firma *The Morgan Crucible Company Limited* entwickelt. Diese Verbindungsart ist als die sogenannte Einstampfverbindung bekannt geworden. Die guten Eigenschaften dieser Verbindung wurden dadurch bestätigt, dass sie unmittelbar nach dem Ablauf der Patente von den anderen Bürstenfabrikanten angewendet worden ist und noch heute die wichtigste Verbindungsart darstellt. Das Einstampfen eines Kupferkabels mit Metallpulver ergibt eine mechanisch starke Verbindung mit kleinem elektrischen Widerstand. Eine große Zahl von Änderungen gegenüber der ursprünglichen Originalausführung erlaubte es, diese Verbindungsart auch bei sehr dünnen Kohlebürsten anzuwenden.

Der Umstand, dass es eine ganze Reihe von Hersteller von Kohlebürsten gibt, führt dazu, dass die Art und Weise, wie derartige Stampfkontakte hergestellt werden, von den meisten dieser Hersteller zwar in internen Fabrikationsvorschriften festgelegt wurden, deren Einzelheiten jedoch nicht veröffentlicht werden. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass nahezu keine Veröffentlichungen über den Fabrikationsprozess existieren.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit konzentriert sich auf diesen Fabrikationsprozess, der für die wesentlichen Eigenschaften des Stampfkontaktes verantwortlich ist. Ziel ist es, durch die Untersuchung der Fertigungsvorgänge die genaue Kenntnis der Einflüsse bei der Fertigung kennen zu lernen, um damit die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der gesamten Kohlebürste sicherstellen zu können.

2.1 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES

Die Festigkeit der Stampfverbindung, insbesondere die Festigkeit gegen Ausreißen des Kabels, ist abhängig vom Grad der Verpressung des Pulvers. Ein hoher Verpressungsgrad kann durch einen hohen Pressendruck erreicht werden.

Auf der anderen Seite stehen der Steigerung des Pressendruckes Grenzwerte gegenüber, die durch das Basismaterial der Kohlebürsten bestimmt sind.

Das eigentliche Ziel ist es, genau jene Grenzwerte festzustellen, die es ermöglichen, jene Festigkeit einer Einstampfverbindung zu erzeugen, die für diese spezifiziert worden ist. Ein Ziel einer maschinellen Herstellung ist es auch, Produkte möglichst schnell herzustellen. Bei einer gegebenen Belastbarkeit eines Basismaterials kann in der Fertigung von Stampfkontakten durch weniger kraftvolle Schläge und kleineren Mengen Pulvers zusammen mit einer höheren Anzahl von Schlägen die Festigkeit der Einstampfverbindungen gesteigert werden. Dem steht entgegen, dass die Erhöhung der Schlagzahl mehr Zeit in Anspruch nimmt, und dadurch die Leistung der Maschine gemindert wird.

2.2 ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES

Die elektrischen Eigenschaften eines Stampfkontaktes hängen eng mit seinen mechanischen Eigenschaften zusammen. Gesucht wird dabei ein Übergangswiderstand, der so klein ist, dass die Verluste und insbesondere die erzeugte Verlustwärme bei Stromdurchgang durch den Stampfkontakt die Kohlebürsten nicht zerstören kann.

Frühere Materialuntersuchungen¹ haben gezeigt, dass Eigenschaften des Stampfpulvers und aber auch seine Vorgeschichte, wie die Lagerung des Pulvers, welchen Einflüssen das Pulver vor der Verarbeitung ausgesetzt war, welche Umweltbedingungen bei der Verarbeitung herrschten, die elektrischen Eigenschaften eines Stampfkontaktes stark beeinflussen. Bei derartigen Untersuchungen wurde auch festgestellt, dass die Versiegelung des Stampfkontaktes chemische Veränderungen bewirken kann, wodurch der elektrische Übergangswiderstand unzulässig erhöht werden kann.

Andere Untersuchungen beschäftigten sich mit dem thermischen Verhalten von Stampfpulver. Durch die Herstellung von Sinterteilen ist bekannt, dass gepresste Pulver unter Einfluss von Temperatur eine negative Volumenänderung erfahren. Dieses Schrumpfen ist von der Behandlungstemperatur und der Zeit der Temperatureinwirkung abhängig. Es ist bekannt, dass beispielsweise bei Kupfer ab etwa 200° C Rekristallisationsprozesse beginnen, die zu der Volumenänderung

¹ Hersteller von Stampfpulver, aber auch die verarbeitenden Betriebe untersuchen die verwendeten Materialien auf ihre Eignung zur Herstellung von Stampfkontakten. Hier getroffene Feststellungen basieren auf Informationen der Firma Schunk.

führen. Die Erreichung derart hoher Temperaturen ist mindestens zeitweise bei Hochstrom Kohlebürsten möglich. Versuche haben weiter gezeigt, dass durch Zumischen von Graphit mit bis zu zwei Gewichtsprozent und Zinn mit bis zu 17 Gewichtsprozent die Volumenänderung günstig beeinflussbar ist, andererseits aber der Übergangswiderstand zunimmt, genauso wie die Neigung zur Oxidation des Pulvers. Obwohl unter anderem die thermische Ausdehnung zu Beanspruchungen der Stampfkontakte führen, werden dazu, im Rahmen dieser Arbeit, keine Untersuchungen durchgeführt².

Im folgenden wird von standardmäßig verwendeten Pulvern ausgegangen und deren elektrischen Eigenschaften untersucht. Dazu werden Presslinge mit unterschiedlichen Pressendruck hergestellt und Parameter, wie Raumgewicht, Verdichtungsfaktor, spezifischer elektrischer Widerstand und die Biegefestigkeit, untersucht.

2.3 BEARBEITUNGSVORSCHRIFTEN

Die Wiederholgenauigkeit in der Fertigung ist abhängig von der Möglichkeit, vorherzusagen, wie sich geänderte Einstellungen an der Maschine auf den Fertigungsprozess auswirken.

In den Bearbeitungsvorschriften sind jene Parameter beschrieben, die zur Sicherung der Qualität bei der Fertigung zu beachten sind. Dabei sind die wichtigsten Kriterien bereits in den vorher behandelten Punkten erläutert worden. Hier geht es darüber hinaus um die Frage, welche Möglichkeiten zur Einstellung existieren, und wie sich unterschiedliche Einstellungen gegenseitig beeinflussen.

Als Ergebnisse unserer Untersuchungen soll die Positionierung der Initiatoren, die den Stampfprozess beeinflussen, genau bestimmt werden können. Darüber hinaus sollen für die Bearbeitungsvorschriften Parameter bestimmt werden, die bei der Fertigung zu verbesserten Ergebnissen führen sollen.

² Thermische Belastungen von Kohlebürsten über 200° C treten im Normalbetrieb nicht auf. Aus der praktischen Erfahrung ist bekannt, dass der Einfluss der Volumenänderung durch Erwärmung wegen der vergleichsweise geringeren Dichte des verpressten Pulvers zum homogenen Material nur eine untergeordnete Rolle spielt.

2.4 QUALITÄTSANFORDERUNGEN

Allgemein gilt, dass Endverbraucher an Produkte hohe Qualitäts- und Zuverlässigkeitserwartungen haben. Bei industriellen Abnehmern von Kohlebürsten gibt es nahezu keine Bereitschaft, Mängel in der Fertigungsqualität hinzunehmen. Das geht soweit, dass sogar 100% geprüfte Produkte verlangt werden. Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, haben viele Unternehmen ein Qualitätsmanagementsystem nach den ISO 9000 Normen in ihren Betrieben eingeführt. Im wesentlichen wird dort gefordert, dass die dort ablaufenden Prozesse der Qualitätssicherung nach Kriterien dokumentiert und ständig verbessert werden (vgl. [ISO9000]).

Ursprünglich wurde definiert, dass Qualität als Einhaltung von Grenzwerten zu verstehen ist. Eine derartige Definition bietet wenig Anreiz zu einer fortlaufenden Verbesserung der Produktqualität. Bei der konventionellen Qualitätsüberwachung wird der Grad der Abweichung vom Zielwert nicht berücksichtigt. Falls ein Wert außerhalb des Toleranzbereiches liegt wird das entsprechende Teil entweder noch einmal in den Verarbeitungsprozesses zurückgeleitet oder ausgeschieden. Liegen die Teile innerhalb erlaubter Grenzen werden sie akzeptiert. Solange also die Produkte innerhalb der geforderten Toleranzen erzeugt werden, wird auf Grundlage dieses Ansatzes kaum jemand bestrebt sein, über Verbesserungen in Produktionsprozessen nachzudenken. Einen völlig neuen Ansatz formulierte der japanische Wissenschaftler Dr. Genichi Taguchi, der eine sogenannte Verlustfunktion mit quadratischem Verlauf einführte. Nach diesem Modell existiert ein Zielwert der Variablen, in dessen Minimum der von Taguchi definierte „Verlust“ am kleinsten ist. Stark vereinfacht lautete die Zielvorstellung, dass alle Teile möglichst „verlustfrei“, also möglichst nahe an einem definierten Zielwert produziert werden³.

Eine üblicherweise verfolgte Strategie, besser als minimal erforderlich zu produzieren, stellt zwar sicher, dass möglichst viele Gutteile erzeugt werden, geht aber in der Regel zu Lasten der Maschinenleistung. Zur Erfüllung höherer Qualitätsanforderungen und zur besseren Qualitätskontrolle sollen durch unsere Untersuchungen die Einstellmöglichkeiten für Grenzwerte an der Maschine eingengt werden können. Ein weiterer Nutzen bei der Einengung von Grenzwerten ist beispielsweise bei einer Verringerung der Anzahl von Verdichtungsschlägen

³ Weiterführende Literatur: [Tag85], [Tag90], [Blä01]

gegeben, weil dadurch unmittelbar die Leistung der Maschine gesteigert werden kann⁴.

⁴ In der Reihe der Fertigungsprozesse benötigt das Einstampfen des Kabels die längste Zeitdauer.

3. NORMEN UND VORSCHRIFTEN

In diesem Abschnitt werden Normen und Vorschriften für die qualitätssichernden Maßnahmen beschrieben, die den Messungen als Grundlage oder Anleitung zur Durchführung dienen. Bei den Vorschriften, die bei der Herstellung angewendet werden, werden Parameter für die Beeinflussung des erzeugten Produktes untersucht.

3.1 NORMEN

Einen guten Überblick über die anzuwendenden Normen gibt das DIN-Taschenbuch 221 [DIN221]. In diesem Werk sind die einschlägigen DIN Normen für Kohlenstoffmaterialien zu deren Eigenschaften, Anforderungen und Prüfungen zusammengestellt.

Im Zusammenhang mit der Herstellung von Stampfkontakten sind nur einige Normen für uns von näherem Interesse. In erster Linie sind das jene Prüfverfahren, die in der DIN IEC 467 „Prüfverfahren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften von Kohlebürsten für elektrische Maschinen“ beschrieben sind. Im wesentlichen geben sie die Bestimmung des elektrischen Widerstandes der Verbindung Bürste zum Stromseil wie Messanordnung und Durchführung für die Messung der Ausreißfestigkeit von in den Bürstenkörper eingestampften oder eingepressten Stromseilen vor. Das zentrale Interesse der Qualitätssicherung eines Herstellers von Kohlebürsten ist es, mit Hilfe der in dieser Norm beschriebenen Messmethoden, die gleichbleibende Qualität der hergestellten Stampfkontakte sicherzustellen. Die Versuchsanordnungen für unsere Messungen entsprechen den in diesen Normen beschriebenen, insbesondere die Angaben zu den Messpunkten. Einige Messungen werden jedoch abweichend von diesen Normen durchgeführt. Darauf wird in diesen Fällen besonders verweisen.

Die Ergebnisse des Herstellungsprozesses werden durch zwei Haupteinflüsse bestimmt: jene, die von den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Materialien abhängen und jenen, die durch die Art der Herstellung und durch die Einflüsse bestimmt werden, welche während des Herstellungsprozesses auftreten. Zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften können die in der DIN IEC 413 „Prüfverfahren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe von Kohlebürsten für elektrische Maschinen“ beschriebenen Messmethoden

herangezogen werden. Neben anderen Prüfungen ist hier die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften, dabei vor allem der elektrische Widerstand, und der mechanischen Eigenschaften, dabei besonders die Biegefestigkeit¹, von besonderem Interesse.

3.2 VORSCHRIFTEN

Zur Sicherstellung von Eigenschaften sind in den meisten Herstellungsbetrieben eigene Herstellungs- und Qualitätsnormen eingeführt worden. Eigene Prüf- und Kontrollstellen überwachen die Einhaltung dieser Vorschriften. Neben firmen-internen Vorschriften sind Prüfmethode auch in Normen zusammengefasst.

Die Vorgaben bei der Herstellung betreffen zunächst die unmittelbaren produktbezogenen Vorgaben. Diese Vorgaben beziehen sich auf bestimmte Eigenschaften und die Konstruktion der Kohlebürste. Die Eigenschaften selbst werden von den verwendeten Grundwerkstoffen bestimmt und sind für diese Arbeit nur bezüglich ihrer physikalischen Eigenschaften von Interesse. Auch die Konstruktionsmerkmale wie beispielsweise Abmessungen dürfen normalerweise beim Herstellungsprozess nicht mehr variiert werden und sind daher als gegeben hinzunehmen. Damit verbleibt nur ein geringer Spielraum für die Einstellungen selbst.

Die Anforderungen an das Produkt betreffen den Übergangswiderstand zwischen Kabel und Kohlebürste und die Festigkeit der Kabelverbindung. Unter idealen Bedingungen, wenn beispielsweise keine Verluste durch Reibung bewegter Maschinenteile auftreten oder homogene Materialien mit konstanten Materialeigenschaften vorliegen, kann gleichbleibende Qualität des Produktes verhältnismäßig einfach erreicht werden. In der Realität, also an der Maschine, muss jedoch mit störenden Einflüssen gerechnet werden. Die Reibungsverluste an der Maschine selbst können nicht verhindert werden, es kann jedoch darauf geachtet werden, dass die Grundeinstellungen des Stampfrohrs genau zentrisch zur Bohrung vorgenommen wurden, dass weiter der vorgeschriebene Abstand des Stampfrohrs zur Wand der Kohlebürste gegeben ist und dass schließlich Richtung und Verlauf der Bohrung mit der Richtung und dem Verlauf der Stampfbewegung übereinstimmen.

¹ Die Biegefestigkeit wird auch als Biegebruchfestigkeit und fallweise als Kurzbiegefestigkeit bezeichnet. Die Ermittlung der Kurzbiegefestigkeit erfolgt in einem Drei-Punkt Messverfahren ähnlich, wie es in der Norm beschrieben ist, jedoch mit einem Auflageabstand von nur 10 mm.

Bezüglich der interessierenden Parameter Widerstand und Festigkeit selbst soll ein Zusammenhang zur umgesetzten Schlagenergie bestimmt werden. Die Schlagenergie ist nur durch die Variation der Schlagkraft beeinflussbar, weil die Masse des Stampfrohrs nur in groben Schritten veränderbar ist². Die Beeinflussbarkeit der Schlagkraft erfolgt einerseits durch die Fallhöhe und andererseits durch die Verwendung von Zugfedern. Die Fallhöhe entspricht dem an der Maschine eingestellten Hub, der seinerseits als Füllschieber den Pulverfluss des Stampfpulvers beeinflusst. Dabei ist jenes Mittelmaß zu suchen, das bei gegebener Festigkeit der Wand des Bohrloches die Umsetzung der größtmöglichen Schlagenergie zulässt. Anders formuliert: man möchte mit der geringsten Zahl von Verdichtungsschlägen eine Verbindung erzeugen, die genau die spezifizierten Anforderungen erfüllt.

² Die Beeinflussbarkeit bedeutet den Einsatz unterschiedlicher Stampfmaschinen, die auf Grund ihrer Konstruktion andere Massen bewegen.

4. MODELLE UND VERSUCHSANORDNUNGEN

In diesem Abschnitt werden Modelle und theoretischen Analysen vorgestellt, die zu weiteren Versuchen führen, um die Maschinenparameter derart zu beeinflussen, dass einerseits die Leistung der Einrichtung gesteigert, andererseits die Wiederholgenauigkeit durch Einschränkung von Toleranzgrenzen verbessert werden kann. Ebenso werden Modelle zur Bestimmung der auftretenden Kräfte erarbeitet, um die Grenzen der maximalen mechanischen Belastbarkeit der verwendeten Werkstoffe feststellen und daraus resultierende Einstellungen festlegen zu können.

4.1 MODELL FÜR DAS STAMPFNIVEAU

In der Einleitung wurde die Bedeutung der Füllung des Bohrloches kurz angedeutet. Dabei wurde auf die Problematik der Abfrage der Stampfhöhe mit Hilfe eines Endschalters mit seiner beschränkten Lebensdauer verwiesen. In einem ersten Ansatz wurde ein Modell entwickelt, das es erlauben sollte, anstelle des mechanischen Endschalters Initiatoren zu verwenden. Mit Hilfe der Abbildung 4.1 (Bewegungen des Stampfzylinders) soll die Idee dazu näher erläutert werden.

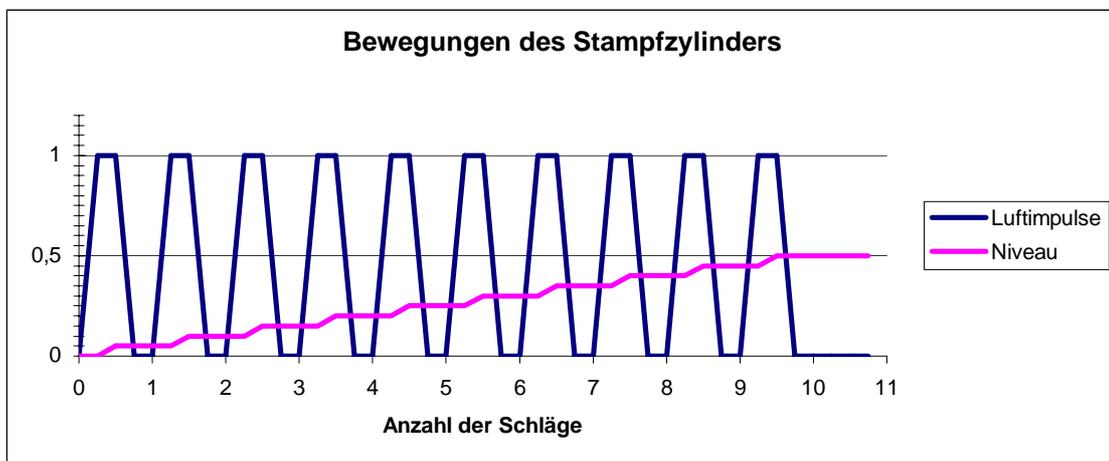


Abb. 4.1: Bewegungen des Stampfzylinders

Abb. 4.1 zeigt das theoretische Weg-Zeitdiagramm eines Stampfvorganges. Angenommen wurde hier, das Bohrloch sei nach 10 Schlägen gefüllt und die vollständige Füllung entspreche der halben Hubhöhe. Weiter seien auf der Ordinate die anregenden Druckluftimpulse des Stampfzylinders und auf der Abszisse die Zeit dargestellt. Der Wertebereich der Ordinate ist in der Zeichnung als Intervall $[0,1]$ angegeben mit der Bedeutung [Druckluft ausgeschaltet, Druckluft eingeschaltet]

oder, bezogen auf den Stampfzylinder, mit der Bedeutung der Bewegungsendlagen [unten, oben]. In hier betrachteten Fall soll die Linie mit dem Wert 0,5 das zu erreichende Stampfniveau darstellen. Die dafür benötigte Zeitspanne liegt in einem Intervall $[0,x]$, wobei x die Anzahl der Hübe bedeutet. Die Zeiteinteilung hängt von der Schlagfrequenz ab, daher wählen wir als Zeiteinheit die Zeitdauer für einen Schlag ohne weitere Definition einer Teilung der Skala.

Betrachtet man aufeinanderfolgende Schläge, rieselt bei einem Stampfvorgang eine entsprechende Menge Pulver durch die freigegebene Öffnung des Stampftrichters. In diesem Beispiel wurde vereinfachend angenommen, dass die Pulvermenge bei jedem Schlag gleich groß ist. Bei der Abwärtsbewegung wird das Pulver verdichtet. Während die Luft im Zylinder zur Gänze entweichen kann, wird das Stampfrohr durch das aufgeschichtete Pulver in seiner Abwärtsbewegung behindert. Die untere Endlage der Bewegung des Stampfzylinders wird sich entlang jener Linie verändern, die in der Abb. 4.1 mit „Niveau“ bezeichnet ist.

In diesem Modell interessiert das Stampfniveau als eine der Zielgrößen, die wiederholgenau erreicht werden sollen. Nach dem Erreichen der halben Hubhöhe bleibt das Niveau fest, weil zu diesem Zeitpunkt der Vorgang abgebrochen wird. Bis zum Erreichen der halben Hubhöhe steigt das Niveau aber mit jedem Schlag um die Höhe (Menge) der verdichteten Pulverfüllung¹ an.

In der obigen Abb. 4.1 ist unterstellt, dass die Luftimpulse und die Pausen äquidistant sind. Jener Endschalter², der die Niveauabfrage regelt, wird in einem Bereich oberhalb der halben Hubhöhe betätigt und unterhalb nicht. Daraus ergibt sich, dass bis zum 9. Schlag der Endschalter nach Beendigung jedes Schlages unterbricht, nach dem Erreichen des Niveaus jedoch dauernd betätigt bleibt.

Damit kann die Abfrage des Niveaus mit Hilfe einer Zeitfunktion mit fest vorgegebener Zeit realisiert werden. Wird der Endschalter länger als dieser Zeitraum dauernd betätigt, wird die eingestellte Zeit überschritten, die Meldung *Niveau erreicht* gebildet und der Vorgang des Stampfens beendet.

¹ Es wurde ein weitgehend lineares Verhalten unterstellt. Tatsächlich müsste die Pulvermenge mit jedem Schlag etwas größer werden, weil nach jedem Schlag der Zylinder weniger weit angehoben werden muss, also schneller seine obere Endlage erreicht und damit die Öffnung etwas länger freigibt. Wir werden später darauf nochmals eingehen.

² Vergleiche Kapitel 1

Die Überlegung war nun, anstelle eines mechanischen Endschalters zwei Initiatoren zu verwenden. Im Modell kann ein Initiator für die Abfrage des Niveaus vorgesehen werden, der genau den mit 0,5 bezeichneten Wert, gleichzusetzen mit dem Zielniveau, abfragt und ein weiterer, am Drehschieber angebracht, der jenen Zeitpunkt feststellt, der das Ende des Belüftungsvorganges meldet. Offenbar liegen diese Zeitpunkte jeweils genau am Ende einer Hub- Absenkbewegung und sind in der Zeichnung durch die Nummerierung der Schläge ersichtlich.

Die ersten Versuche scheiterten. Dies konnte auf zwei Umstände zurückgeführt werden: einerseits reagierte die nachgeschaltete Steuerung (SPS) zu langsam, die Eingangsverzögerung der verwendeten Steuerung war in der Größenordnung mit etwa 10 ms spezifiziert und darüber hinaus benötigte die Steuerung für die Programmbearbeitung um etwa 30 ms. Andererseits konnte auch der Schaltzeitpunkt nicht genau lokalisiert werden. Es stellte sich heraus, dass beim Verändern der Schlagfrequenz auch der Schaltzeitpunkt, zwar nur geringfügig aber dennoch, verschoben wurde. Zusätzlich musste die Betätigungsfahne für den Initiator, aufgrund der oben genannten Eingangsverzögerung und der Schlagfrequenz, entsprechend lang gewählt werden, um überhaupt der Steuerung die Möglichkeit zugeben, das Signal zu erkennen. Es ist sofort einsichtig, dass eine Schaltfahne, die eine größere Wegstrecke überdeckt, die geforderte punktgenaue Reaktion auf diese Strecke ausdehnt. Dadurch konnte auch die gewünschte Wiederholgenauigkeit nicht mehr erreicht werden. Schien es zu Beginn der Versuche noch so, dass durch kleine Verbesserungen, wie Variation der Abstände Schaltfahne – Initiator und Anpassungen der Position der Abfragepunkte, bei langsamen Stampfungen brauchbare Stampfkontakte hergestellt werden konnten, wurden die Ergebnisse bezüglich Anzahl der Schläge und Genauigkeit der Füllhöhe bei den Versuchsreihen mit höheren Schlagfrequenzen immer schlechter, bis nach dem Zeitpunkt des Überschreitens einer Grenzfrequenz nur mehr Zufallsergebnisse beobachtbar waren.

Die prinzipielle Anwendbarkeit des Modells konnte erst später nachgewiesen werden. Sie hat im Weiteren zur Entwicklung des sogenannten Stampfcontrollers geführt, der später behandelt wird.

Weiters hat das Modell zur Idee der Aufzeichnung von Bewegungsabläufe mit Hilfe eines Oszillographen geführt, wobei der zurückgelegte Weg des Stampfrohrs mit Hilfe eines Wegmesssystems mit analogem Ausgangssignal aufgezeichnet werden kann. Dieses Messprinzip wird bei Messungen später angewendet.

4.2 MODELL FÜR DAS AUFSETZEN

Eingangs wurde darauf hingewiesen, dass bei zu raschem Aufsetzen des Stampfwerkzeuges Bruchgefahr für die Kohlebürste besteht. Die Zusammenhänge werden in einem Modell erläutert. In der folgenden Abbildung 4.2 ist ein erstes Modell für den Stampfkopf schematisch dargestellt.

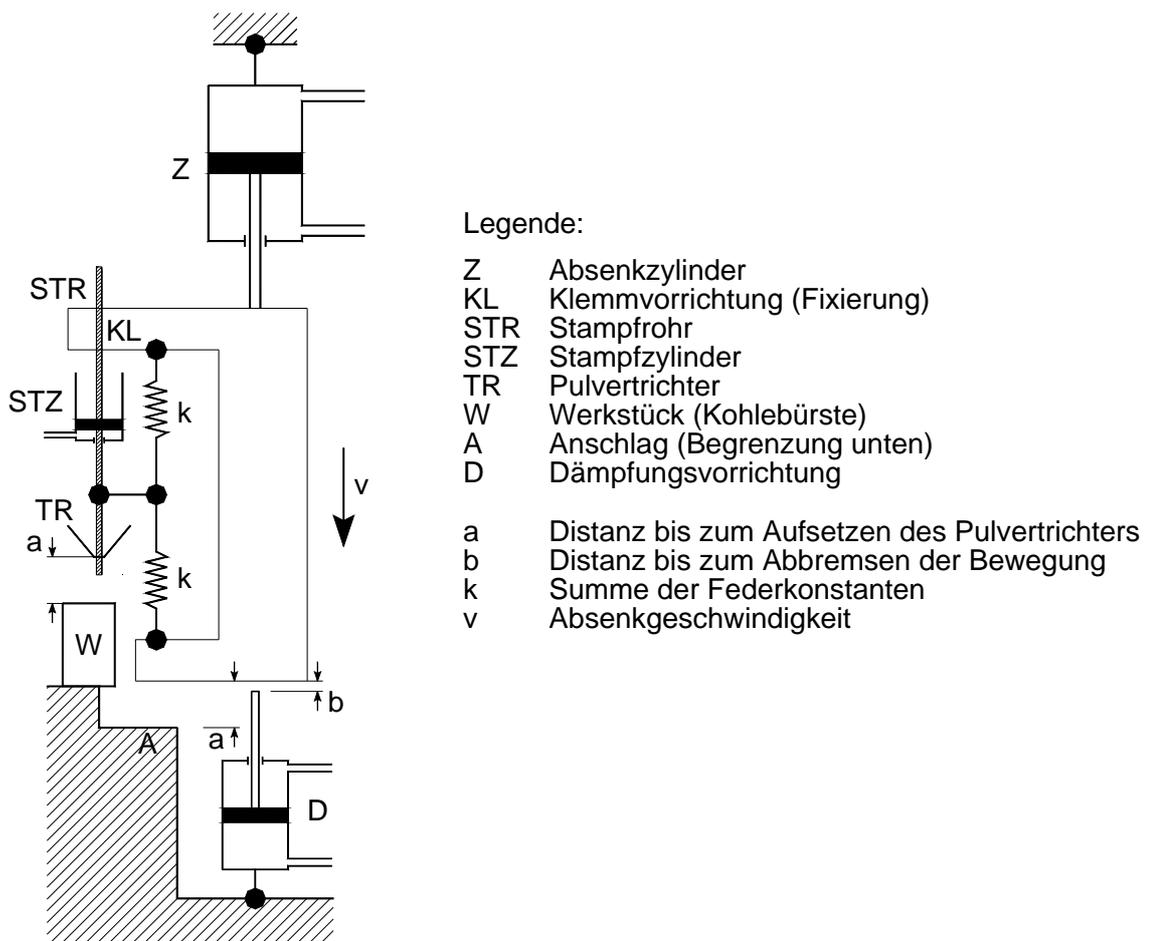


Abb. 4.2: Modell des Stampfkopfes

In Abbildung 4.2 ist das Gesamtmodell des Stampfkopfes mit seinen wesentlichen Bauelementen dargestellt. Es besteht aus einem beweglichen Hauptteil, der durch den mit Z bezeichneten Hubzylinder abgesenkt und gehoben werden kann. Der Hauptteil ist ein Schlitten mit der Masse M , der auch den Stampfzylinder, den Pulvertrichter und die im Stampfzylinder beweglichen Teile, wie das Stampfrohr mit dem Stampfwerkzeug, trägt. Während des Stampfvorgangs selbst wird die Masse M festgehalten und nur der Stampfkopf mit der Masse m bewegt. Während des Absenkens sind beide Massen jedoch durch eine Klemmvorrichtung KL miteinander gekoppelt, so dass bei der Berechnung der Bewegungsenergie die

Gesamtmasse $M + m$ zu berücksichtigen ist. Die zu überwindende Hubhöhe setzt sich zusammen aus der Summe der Bohrlochtiefe und der benötigten Kabellänge. Die Begrenzung der Hubbewegung erfolgt durch Anschläge, wobei in der Skizze der untere Anschlag mit A bezeichnet ist.

Eingangs wurde mit Hilfe der Gleichungen 1.1 und 1.2 ermittelt, dass, wenn eine maximale Aufsetzgeschwindigkeit existiert, diese auf Grund der umgesetzten Energie beim Aufsetzvorgang etwa $0,07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ betragen darf. Begründet wird die bis zum Bruch führende Belastung, dass einerseits der Trichter dicht über dem Bohrloch aufgesetzt werden muss, um das Stampfpulver genau in die Bohrung zu führen, andererseits auch die zur Knotenbildung vorhandene Überlänge des Kabels beim Einführen in die Bohrung gestaucht wird und damit eine Kraftwirkung auf die Bohrlochwände ausübt.

In der Praxis zeigte sich, dass die Lösung, die Bewegung mittels Ölbremsvorrichtungen abzufangen, nicht unproblematisch ist, da insbesondere der Wartungszustand der Bremsvorrichtung für den Dauerbetrieb sicherzustellen ist. Die Alternative, die Hubbewegung mit einer Achse zu steuern, ist zumindest bei bestehenden Maschinen nicht kostengünstig nachrüstbar.

4.2.1 ABBREMSEN EINER BEWEGUNG VOR ERREICHEN DER ENDLAGE

Für den Versuch wurde folgender Aufbau (pneumatische Schaltung) verwendet:

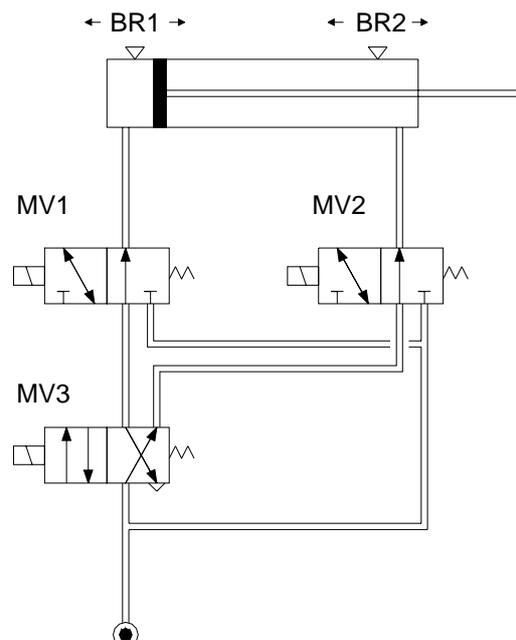


Abb. 4.3: Schaltung 1

In der Schaltung 1 (Abb. 4.3) werden zusätzlich zum vorhandenen Hauptventil (MV3) für die Bewegung Bremsventile (MV1 und MV2) angeordnet, die jeweils bei der Senk- bzw. bei der Hubbewegung über zusätzliche, in der benötigten Position einstellbare, Endschalter (BR1 und BR2) und einer reaktionsschnellen Steuerung das Bremsen der Bewegung bewirkten. Besonderer Wert wird dabei auf die unmittelbare Reaktion, innerhalb weniger Millisekunden, auf das Erkennen der Bremszeitpunkte gelegt.

Bei den vorhandenen Stampfköpfen ist die nachträgliche Anordnung von Schaltern auf Grund fehlender Befestigungsmöglichkeiten nicht einfach zu bewerkstelligen. Zur Erprobung der Schaltung wurde eine provisorische Befestigungsmöglichkeit am oberen Joch des Stampfkopfes geschaffen. Die Schalter für die Bestimmung des Startzeitpunktes des Bremsens wurden dazu an einem Winkel befestigt und verstellbar angeordnet. Die Betätigung der Schalter erfolgte durch eine Schalfahne, die zwischen den Fixierungsmuttern für die Begrenzung der Senkbewegung mitgeklemmt war.

Für die Bewegungskontrolle wurde eine schnelle Mikroprozessorsteuerung eingesetzt, die seitens der verwendeten Hardware kurze Reaktionszeiten ermöglicht und durch die direkte Programmierung Wiederholgenauigkeiten (Schalt- und Programmlaufzeitunterschiede) besser als Zehntel Millisekunden ermöglicht.

Für die Erprobung wurden zwei Programmvarianten vorgesehen:

Variante 1: Einschalten der Bremswirkung (Gegendruck) bei Erreichen des zugehörigen Schalters, Ausschalten der Bremswirkung bei Erreichen der unteren Endlage. Die Überlegung dazu war, die maximale Bremswirkung zu gewährleisten wobei durch Verschiebung des Bremszeitpunktes das Einsetzen der Bremswirkung einstellbar gemacht werden konnte.

Variante 2: Einschalten der Bremswirkung (Gegendruck) bei Erreichen des zugehörigen Schalters, Ausschalten der Bremswirkung mittels einer voreingestellten Zeit (beim Versuch wurde nur eine feste Zeiteinstellung verwendet). Diese Variante soll bis kurz vor dem Erreichen der Endlage die Bewegung bremsen und nach Ablauf der Zeit wieder freigeben.

Außer der Tatsache, dass nur Ventile aus Ersatzteilbeständen für die Erprobung der Schaltung zur Verfügung standen, konnten neben beiden Steuerungsvarianten auch Variationen der pneumatischen Schaltung erprobt werden.

Der Versuch mit der Steuerungsvariante 1 wurde mit der Schaltung nach obiger Skizze durchgeführt. Die Bremsluft ist dabei alternativ auch als externe regelbare Versorgungsluft eingespeist worden. Das Erzeugen eines Gegendrucks durch kurzzeitiges Einschalten des jeweiligen, der Bewegungsrichtung zugeordneten Bremsventils, bremste den Kopf bis zum Stillstand ab³, wobei nur geringes Nachfedern durch den Luftpolster beobachtet werden konnte. In der Programmvariante 1 wurde die Endlage oben/unten nicht erreicht (d.h. der Kopf blieb stehen und daher wurde der Schalter für das Aufheben der Bremswirkung durch Ausschalten des Gegendruckes nicht erreicht). Außerdem sollte die Bremswirkung ohne die Wirkung der vorhandenen Ölbremsvorrichtung beobachtet werden, daher wurden die weiteren Versuche mit der Variante zeitbegrenzt Bremsen gefahren (Programmvariante 2).

Dazu wurden unterschiedliche vorhandene Ventile und einige Varianten der pneumatischen Schaltung, z.B. durch Verwendung von Drosseleinrichtung und Variation des Druckes, ausprobiert, wobei die oben skizzierte Schaltung sich als tauglich herausstellte. Auch verschiedene der vorhandenen Ventiltypen wurden getestet. Als bestes Ergebnis wurde ein Reaktionsweg von etwa 20 mm beobachtet. Dieser Versuch wurde bei 6 bar (Nenndruck, die ausströmende Luft war ungedrosselt) durchgeführt.

Festzustellen ist, dass der Reaktionsweg, bedingt durch die Schaltzeiten der Ventile, auf etwa die Hälfte reduziert werden sollte. Trotz des verhältnismäßig langen Bremsweges ist diese Versuchsreihe als erfolgreich zu beurteilen.

4.2.2 SCHALTUNGSVARIANTE

Für weitere Versuche sollte die Schaltung erweitert werden. Dazu sollten Bremsventile verwendet werden, die durch Hilfsluft unterstützt, größere Luftmengen zulassen und schnellere Schaltzeiten aufweisen, als jene, die bei den ersten Versuchen verwendeten Ventilen möglich waren. Zusätzlich sollten diese Ventile auch zur Beaufschlagung von Gegendruck über die Auslassseite geeignet sein.

³ Der Stillstand des Kopfes war nicht geplant. Die Bremswirkung ist durch Verstellen der Endschalter für den Bremszeitpunkt einstellbar. Der Bremsweg wurde nicht gemessen.

Erwartet werden geringere Reaktionszeiten (schnelleres Abbremsen).

Zusätzlich sollte versucht werden, die Abbremsbewegung in einem Weg-Zeit Diagramm beim Aufsetzen aufzuzeichnen, um weitere Erkenntnisse über den Bremsvorgang zu erhalten.

Der Schaltungsvorschlag ist in Abbildung 4.4 gezeigt.

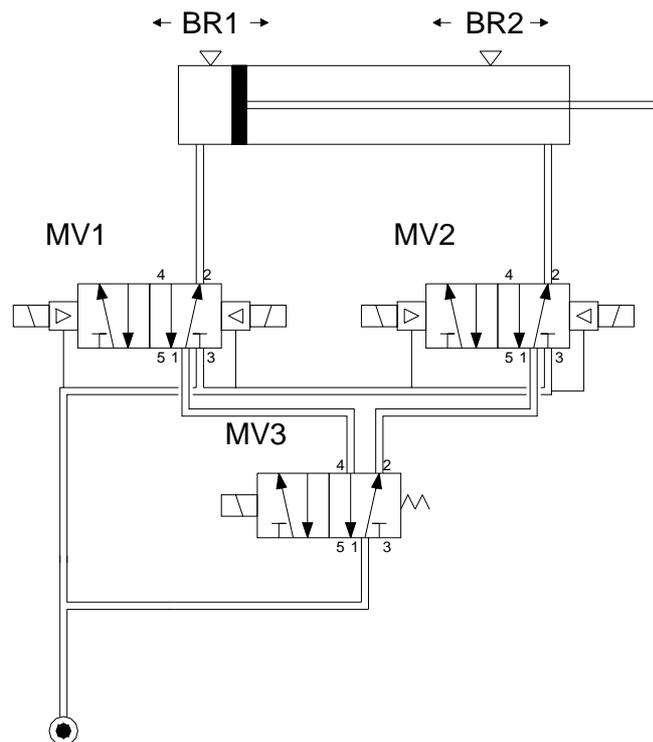


Abb. 4.4: Schaltung 2

Die mit Hilfsluft vorgesteuerten Bremsventile (MV1 und MV2) weisen schnellere Schaltzeiten auf, als jene, die bei den vorher durchgeführten Versuch zur Verfügung standen. Die unbenutzten Kanäle der Ventile müssen bei diesen Ventiltypen verschlossen werden. Die Erprobung der Schaltung konnte jedoch noch nicht durchgeführt werden⁴.

4.2.3 PROGRAMMVARIANTEN

Zum Konzept der Steuerung ist zu fragen, ob für das Aufheben der Bremswirkung gegenüber den bereits erprobten weitere Möglichkeiten bestehen. Eine „Restgeschwindigkeit“ vor dem Aufsetzen des Kabelendes am Bohrlochboden ist zur

⁴ Für den Ankauf der Ventile wurden die benötigten Mittel (noch) nicht freigegeben.

Knotenausbildung erwünscht, wobei diese Restgeschwindigkeit nicht zur Beschädigung der Kohlebürsten führen darf (vgl. die vorhergehenden Berechnungen der umgesetzten Energie und die Ermittlung einer mittleren Geschwindigkeit für zerstörungsfreies Aufsetzen).

Überlegt wurden dazu folgende Programmvarianten:

- Variante 1: Wie bei der erfolgreichen Versuchsdurchführung (siehe weiter oben), aber mit einer einstellbaren Zeit. Diese garantiert nach dem Abbremsen der Bewegung eine Weiterfahrt. Ob eine feste Zeit und die Verstellung der Endschalter die bessere Möglichkeit gegenüber einer einstellbaren Zeit darstellt wäre ebenfalls zu untersuchen.
- Variante 2: Ursprünglich wurde auch überlegt, auf die wartungsintensive Ölbremsvorrichtung völlig zu verzichten. Im Betrieb hatte sich gezeigt, dass diese Vorrichtung in regelmäßigen Abständen neu eingestellt bzw. sogar ersetzt werden musste, da die Bremswirkung mit fortschreitender Betriebsdauer nachgelassen hatte. Die Verwendung eines Luftpolsters als nicht ermüdende Feder sollte, wie zuvor, zum Abbremsen verwendet werden. Anstelle der Zeit sollte die Schalthysterese des unteren Endschalters dabei derart ausgenutzt werden, dass dieser bereits knapp vor dem Aufsetzen am unteren Anschlag schaltet. Damit könnte die Bremswirkung vor dem Erreichen des unteren Totpunktes der Bewegung wieder aufgehoben werden. Für den Fall, dass der durch den unteren Endschalter gegebene Zeitpunkt sich als zu spät herausstellen sollte wurde Variante 3 überlegt.
- Variante 3: Bremsen unter Einbeziehung der Kontrolle für die Knotenbildung durch den externen Mikroprozessor. Zur Knotenbildung wird in der Hauptsteuerung normalerweise eine feste Zeitverzögerung eingeplant. Durch einen zusätzlichen „Vor-Endschalter“ kann am Ende der Abbremsbewegung durch neuerliches Einschalten des Hauptdruckes eine wegen des kurzen (Rest-)Hubes⁵ eine „sanfte“ Knotenbildung erfolgen, mit der Überlegung, dass dann bei Erreichen der unteren Endlage der Knoten bereits gebildet ist und die in der Hauptsteuerung für die Knotenbildungszeit vorgesehene Verzögerung entfallen kann.

⁵ Kurzhub in der Länge des überstehenden Kabels für die Knotenbildung.

4.3 MODELL DER SCHLAGBEWEGUNG

Mittels einer mechanischen Vorrichtung soll eine genau dosierte Schlagbewegung erzeugt werden. Dabei interessiert insbesondere die Schlagenergie, die bei gegebener Masse proportional zum Quadrat jener Geschwindigkeit ist, mit der die beschleunigte Masse auf das zu bearbeitende Werkstück auftrifft. Die Geschwindigkeit selbst ist die einzige zu bestimmende Größe in diesem System. Die Geschwindigkeit kann messtechnisch durch Aufzeichnung des Bewegungsablaufes in einem Weg-Zeit Diagramms mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden. Als gegeben kann eine im System vorhandene Federkonstante k angenommen werden. Nicht direkt messtechnisch erfassbar sind die auftretenden dämpfenden Einflüsse.

In unserem System ist die Geschwindigkeit jener Parameter, der durch die Einstellmöglichkeiten an der Maschine beeinflussbar ist. Durch den Vergleich einer genügend großen Anzahl von Messergebnissen mit theoretisch ermittelten Werten sollen mit Hilfe eines Modells diese Einflussgrößen bestimmt werden und weitere qualitative Aussagen über Art und Wirkung gefunden werden. In der nachstehenden Skizze (Abb. 4.5) ist das Modell des Stampfkopfes auf die Schlagbewegung reduziert dargestellt.

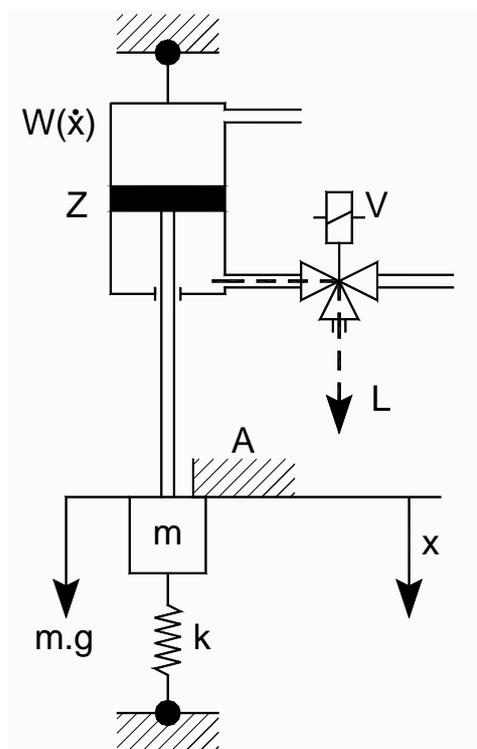


Abb. 4.5: Modell für die Schlagbewegung

Angetrieben durch den Stampfzylinder, der die angreifende Kraft aufbringt, ist ein Feder-Masse-System dargestellt. Die Dämpfung im System ist nicht bekannt. Dazu wird angenommen, dass diese Dämpfung einerseits geschwindigkeitsproportional sein wird, aber andererseits auch konstante Anteile, etwa auf Grund von Reibung und weitere durch die Schaltvorgänge im Ventil, aufweisen wird.

In der Abb. 4.5 ist vereinfachend, anstelle des Drehschiebers mit einem in Reihe geschalteten Ansteuerventil, nur das Magnetventil (V) mit dem dadurch angesteuerten Hubzylinder (Z) angenommen worden. Mit einer ähnlichen Anordnung wurden ebenfalls erfolgversprechende Versuche durchgeführt, die später noch behandelt werden. Dieser Hubzylinder, er wird als Stampfzylinder bezeichnet, hebt eine Masse (m) in eine durch einen festen⁶ Anschlag (A) begrenzte Höhe. Dabei setzt sich die hier betrachtete Gesamtmasse aus allen fest miteinander verbundenen Maschinenelementen, wie Masse des Stampfrohres, Masse der Kolbenstange und des Kolben etc. zusammen. Nach dem Umschalten des Magnetventils (V) wird, durch die Erdbeschleunigung ($m.g$) und unterstützt durch die Spannkraft einer Feder mit der Federkonstante k , die Fallbewegung eingeleitet. Dabei sei die Variable x der in einem zu betrachtenden Zeitraum t zurückgelegte Weg. In der Funktion $W(\dot{x})$ seien die der Bewegung entgegenwirkenden Kräfte, wie Reibung, Luftwiderstand der ausstömenden Luft (L) unter Berücksichtigung des Umschaltverhaltens des Ventils etc., zusammengefaßt. Dabei wurde die Abhängigkeit dieser Funktion von der momentan erreichten Geschwindigkeit unterstellt. Da für den gesamten Vorgang $0 \leq \dot{x}$ gilt (die Geschwindigkeit ist zu jedem Zeitpunkt positiv), wird die Dämpfungsfunktion als quadratische Gleichung in der Form

$$W(\dot{x}) = k_1 + k_2\dot{x} + k_3\dot{x}^2 \quad (4.1)$$

eingeführt, wobei die Faktoren k_1, k_2, k_3 für die konstanten, linearen und quadratischen Anteile der Dämpfungskomponenten angesetzt werden. Da diese Komponenten ausschließlich von der Versuchsanordnung abhängen, also anlagenspezifisch sind, dürfen sie als konstant angenommen werden. Aus der Beziehung für das Gleichgewicht der Kräfte folgt

$$m.\ddot{x} = m.g + k.x - W(\dot{x}) \quad (4.2)$$

⁶ Der Anschlag ist bei der realen Maschine verstellbar, dient auch zur Einstellung der Pulvermenge und ist durch diverse konstruktive Maßnahmen mit dämpfenden Elementen versehen. Auf Grund des Umstandes, dass unterschiedliche Stampfköpfe existieren, existieren konstruktionsbedingt Varianten für diese Dämpfungsglieder.

Führt man als Zustandsvariable $x_1 = x$ und $x_2 = \dot{x}$ ein und setzt man diese Werte in die Gleichungen 4.1 und 4.2 ein gilt für das System

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (4.3)$$

und

$$m.\ddot{x} = m.\dot{x}_2 = m.g + k.x_1 - (k_1 + k_2.x_2 + k_3.x_2^2) \quad (4.4)$$

in der vektoriellen Zustandsraumdarstellung zusammengefasst

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{k}{m} & \left(-\frac{k_2}{m} - \frac{k_3}{m}x_2 \right) \end{bmatrix} \underline{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ g - \frac{k_1}{m} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Die physikalische Bedeutung der so eingeführten Zustandsvariablen sind für $x_1 = x$ der zurückgelegte Weg und für $x_2 = \dot{x}$ die momentan erreichte Geschwindigkeit. Zum Zeitpunkt $t = 0$ gilt wegen der Beschleunigung aus einer Ruhelage $x_{1(t=0)} = h_{\max}$ (h_{\max} ist die Ausgangshöhe) und der Anfangsgeschwindigkeit $x_{2(t=0)} = \dot{x}_{(t=0)} = 0$. Stellt man die Gleichung 4.4 um erhält man

$$\dot{x}_2 = -\frac{k_2}{m}x_2 - \frac{k_3}{m}x_2^2 + \left[g + \frac{k.x_1}{m} - \frac{k_1}{m} \right] \quad (4.6)$$

Zur Vereinfachung der Schreibweise werden folgende Abkürzungen eingeführt:

$$a = -\frac{k_2}{m}, \quad b = -\frac{k_3}{m}, \quad c = \left[g + \frac{k.x_1}{m} - \frac{k_1}{m} \right] \Rightarrow \dot{x}_2 = ax_2 + bx_2^2 + c \quad (4.7)$$

Gegeben sei der folgende Ausschnitt einer Aufzeichnung eines Bewegungsablaufes beim Stampfen, der nach jener Methode aufgezeichnet wurde, die im Abschnitt 4.1 vorgeschlagenen worden ist. Dieser Abschnitt wird in Abbildung 4.6 dargestellt und zeigt eine Fallbewegung mit einer zu bestimmenden Auftreffgeschwindigkeit auf das Pulver. Diese Geschwindigkeit ist als Tangente an die Kurve im Punkt 5 dargestellt, der nachfolgende Verdichtungsvorgang durch die Strecke 5-6.

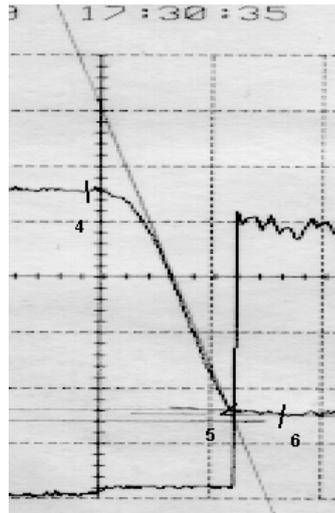


Abb. 4.6: Weg/Zeitdiagramm einer Schlagbewegung

Es interessiert die Geschwindigkeit im Auftreffpunkt. Unter der Annahme, der Abstand des horizontalen Rasters entspreche 20 ms, die Messung der Zeit beginne bei Start der Fallbewegung in Punkt 4 (in dieser Aufzeichnung mit einer bekannten Ausgangshöhe 8 mm) zum Zeitpunkt $t = 0$ und ende im Auftreffpunkt 5 (hier mit der Höhe = 0 mm). In diesem Beispiel beträgt die verstrichene Zeit seit Beginn der Fallbewegung = 24 ms und kann mit Hilfe der aus der Vorgabe bekannten Rasterteilung berechnet werden. Die Geschwindigkeit, dargestellt als Anstieg der Tangente an die Weg/Zeitkurve aus dem Diagramm, kann als Gleichung einer Geraden aufgestellt und ermittelt werden⁷. Die hier ebenfalls gekennzeichnete Strecke 5-6 zeigt den Verdichtungsprozess und wird später diskutiert.

Weiters stellt man fest, dass diese Gerade nicht nur im Auftreffpunkt, sondern als angenäherte Lösungskurve für den gesamten interessierenden Bereich bei den hier gegebenen Versuchsbedingungen verwendet werden kann, weil sich die Tangente mit der aufgezeichneten Kurve in der unteren Hälfte ausreichend genau überdeckt.

Da sich die Geschwindigkeit in einem großen Bereich nahezu nicht verändert⁸ gilt angenähert für die Gleichung 4.7

⁷ In dieser Skizze bedeutet eine senkrechte Rasterteilung ca. 2 mm (Kästchenhöhe), die Unterteilung also ca. 0,4 mm

⁸ Ein analoges Beispiel für die relative Konstanz der Fallgeschwindigkeit bei einer turbulenten Dämpfung: sie kann bei einem Fallschirm beobachtet werden, der unabhängig von seiner Fallhöhe nach dem vollständigen Öffnen mit nahezu gleichbleibender Geschwindigkeit sinkt.

$$\Delta x_2 = 0 = ax_2 + bx_2^2 + c \quad (4.8)$$

mit der Lösung

$$x_2 = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4bc}}{2b} \quad (4.9)$$

wobei nur positive Geschwindigkeiten sinnvoll sind. Aus dieser Forderung lässt sich aus der Ungleichung

$$0 \leq \left(-a + \sqrt{a^2 - 4bc}\right) \rightarrow a^2 \leq (a^2 - 4bc) \rightarrow 0 \leq -4bc \quad (4.10)$$

feststellen, dass b und c verschiedene Vorzeichen haben müssen. Physikalisch gesehen ist diese Aussage plausibel, da die Änderung der Geschwindigkeit nach Gleichung 4.7 von bremsenden Komponenten beeinflusst wird (die durch die Konstanten a und b beschrieben werden) und von treibenden Komponenten beeinflusst wird (die wegen eines angenähert linearen Verhaltens der Geschwindigkeit von der nur vom zurückgelegten Weg abhängigen Variablen c beschrieben ist). Die Variable Größe in c ist die Fallhöhe. Sie ist aus dem Weg-Zeit Diagramm ablesbar.

Diese Methode werden wir bei der Analyse von Aufzeichnungen der Bewegungsabläufe zur Ermittlung von Geschwindigkeiten heranziehen.

Für die Hubbewegung gelten analoge Zusammenhänge, die in Abbildung 4.7 verdeutlicht werden. Jene Kraft, mit welcher der Hubzylinder (Z) auf den Anschlag (A) drückt, ergibt sich als Überschuss zur von der Gewichtskraft und der Spannkraft der Feder gegebenen Senkkräften gegenüber dem durch die zugeführte Luftmenge erzeugten Innendruck (P) im Hubzylinder nach der Beendigung der Hubbewegung (Druckausgleich). Die Schlagbewegung setzt erst dann ein, wenn nach dem Umschalten des Ventils der entstandene Innendruck soweit abgebaut ist, dass die resultierende Kraft ihre Richtung wechselt. Die dafür benötigte Zeit hängt direkt proportional vom angelegten Luftdruck für die Hubbewegung ab, das heißt, bei sonst gleichen Parametern wird ein höherer Luftdruck die Verzögerung des Einleitens der Senkbewegung nach dem Umschalten des Ventils entsprechend vergrößern⁹.

⁹ Eigentlich ein unerwünschter Effekt. Die Öffnungszeit des Pulvertrichters bei einer Stampfmaschine sollte nur von einer einzigen Einstellmöglichkeit manipulierbar sein um deterministische Einstellungen laut einer entsprechenden Vorschrift sicherzustellen. Anzumerken ist noch, dass es wegen des bei der Hubbewegung entstehenden „Prellens“ am oberen Anschlag im Sinne einer Wiederholgenauigkeit nur eine für alle Betriebsfälle günstige Einstellung existiert (das ist genau die maximal zulässige Hubgeschwindigkeit).

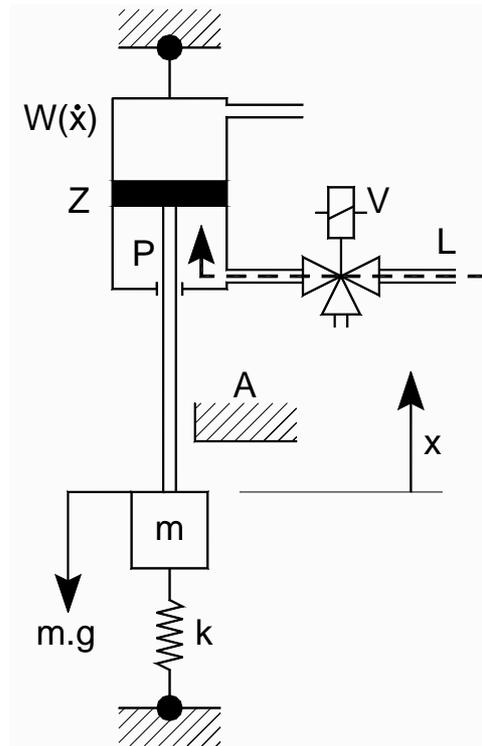


Abb. 4.7: Modell für die Hubbewegung

Vereinfachend wird bei der Aufwärtsbewegung auf die Berücksichtigung eines dämpfenden Einflusses verzichtet. Da die stärkste Dämpfungswirkung dem Einfluss des Pulvers unterstellt wird, kann in diesem Fall das Pulver sich nicht mehr zwischen der Wand der Kohlebürste und dem Stampfrohr verkeilen, im Gegenteil, vorher verkeilte Pulverpartikel werden sich sogar lösen, so dass der Einfluss der Reibungskomponenten klein gegenüber jenem der Aufwärtsbewegung sein wird.

Die Bewegungsgleichung wird durch das Gleichgewicht der Kräfte ähnlich Gleichung 4.2 beschrieben. Es gilt unter den getroffenen Voraussetzungen

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g + k \cdot x \quad (4.11)$$

Eine Aufgabe der Messungen wird es sein, festzustellen, ob die in dieser Gleichung vernachlässigten Reibungseinflüsse nachzuweisen sind und welche Konsequenz daraus abgeleitet werden kann.

4.4 MODELL DES VERDICHTUNGSVORGANGES

Zunächst behandeln wir grundlegende Vorgänge bei der Verdichtung. Beim Fallen oder Schütten ordnen sich die Pulverteilchen unter der Einwirkung der Schwerkraft. Aufgrund des engen Spaltes verkeilen sich einige Teilchen an den Rändern, so dass Hohlräume entstehen können. Beim Pressvorgang werden diese Teilchen zusammengeschoben. Jene Teilchen, die unmittelbar unter dem

Stampfrohr liegen, müssen dabei den größten Weg zurücklegen. Jene Teilchen, die näher am Boden liegen, werden weniger weit bewegt. Durch die Reibung an der Wand beziehungsweise am Kupferseil werden die unmittelbar an der Wand liegenden Teilchen an ihrer Abwärtsbewegung durch Reibung behindert. Daher beginnt unmittelbar unter dem Stampfrohr mit zunehmender Presskraft die Verdichtung. Diese vorverdichtete Zone wächst mit fortschreitender Krafteinwirkung nach unten beziehungsweise von außen nach innen, wobei noch fließfähiges Material weiter nach unten geschoben wird. Dieses Material wird in seiner Bewegung vom Boden der Kohlebürste blockiert. Dadurch beginnt auch vom Boden her die Verdichtung, die auf Grund der weniger wirksamen Wandreibungen schwächer ist als im oberen Teil eines so entstehenden Ringes.

Dieser Vorgang soll experimentell nachgewiesen werden. In dem vorher gezeigten Weg/Zeitdiagramm einer Schlagbewegung (Abb. 4.5) kann ein angenähert lineares Verhalten bei der Verdichtung beobachtet werden (Strecke 5-6). In dieser Aufzeichnung dauerte die Verdichtung nach den dort festgelegten Maßstäben etwa eine halbe Rasterteilung, also 10 ms, und die Höhenänderung kann mit ca. 0,4 mm bestimmt werden. Interessant ist, dass hier der Verdichtungsprozess linear erfolgt.

Für die Versuchsanordnung soll die Höhenänderung zur Untersuchung der Vorgänge bei der Verdichtung stark vergrößert werden. Es sollen dabei unterschiedliche Pulver zu Blöcken verpresst werden, die für Messmethoden auf Grund ihrer Größe besser zugänglich sind weiter untersucht werden können. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Herstellung einer Verdichtung durch einen Schlag andere Eigenschaften zeigen könnte, als jene, die durch eine Verpressung entstanden ist.

Interessierende Eigenschaften, die den zur Verfügung stehenden Messgeräten und Messmethoden zugänglich gemacht werden sollen, sind das Verhalten des Pulvers bei der Verpressung und Materialeigenschaften.

4.5 VERSUCHSANORDNUNG FÜR DIE KRÄFTEBESTIMMUNG

Bei der Herstellung von Stampfkontakten treten verschiedene Kräfte auf. Einerseits sind immer festere und technisch anspruchsvollere Kontakte herzustellen, andererseits will man immer weniger feste Grundmaterialien verwenden, weil diese unter anderen günstigeres Verhalten bei der Kommutierung aufweisen und bessere Gleiteigenschaften besitzen. Dabei steigt die Gefahr der Rissbildung beim Herstellungsprozess wodurch die Kohlebürsten unbrauchbar werden. Man ist also

daran interessiert, die Grenze der Belastbarkeit des Grundmaterials möglichst genau auszunützen um die gewünschte Festigkeit der Kabelverbindung mit der kleinstmöglichen Anzahl von Verdichtungsschlägen zu erreichen¹⁰. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Kräfteverteilung, insbesondere jener Kräfte, die seitlich auf die Wände der Matrize wirken.

4.5.1 VORSCHLAG FÜR EINEN VERSUCHSAUFBAU

Die beim Stampfen auftretenden Kräfte und ihre Verteilung sollen möglichst genau erfasst werden. Während die außen angreifenden Kräfte direkt messbar sind, sind die durch das Verdichten des Pulvers direkt in der Kohlebürste beim Stampfvorgang wirkenden Kräfte nicht einfach erfassbar.

Die in der Kohlebürste auftretenden Verhältnisse sind der direkten Beobachtung nicht zugänglich. Die Möglichkeit, die Kohlebürste anzufertigen und danach den Stampfkontakt anzuschleifen wird angewendet, um eine Vorstellung für die Füllung und Knotenbildung¹¹ zu erhalten. Für die Ermittlung der Verteilung der Kräfte bei der Herstellung ist diese Methode nicht geeignet.

Vorgeschlagen wird eine zerlegbare „Prüfkohle“, an der mit Hilfe von Drucksensoren in 2 Achsen die Kraftverteilungen untersucht werden können. Dabei soll mittels je eines Drucksensors der Druck auf eine Seitenwand und auf den Boden der Kohlebürste gemessen werden. In der Abbildung 4.8 ist die Idee zu dieser Kohle gezeigt.

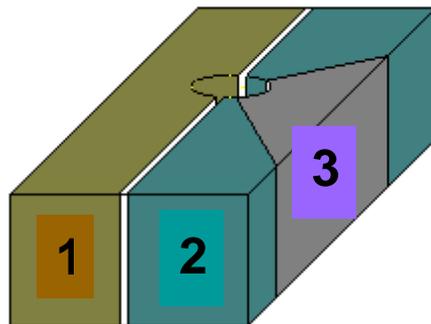


Abb. 4.8: Modell einer Prüfkohle

¹⁰ Eine kleinere Anzahl von Schlägen bedeutet bei gleichbleibender Festigkeit zwar eine höhere Belastung der Kohlebürste aber auch eine kürzere Taktzeit beim Herstellungsvorgang.

¹¹ Beim Einführen des Kabels wird der überstehende Teil des Kabels in das Bohrloch gepresst und die sich daraus bildende Stauchung als Knoten bezeichnet.

Das in der Abb. 4.8 dargestellte Modell ist aus den in der Abbildung skizzierten Teilen zusammengesetzt. Teil 1 bildet die Rückwand des „Grundkörpers“ und ist mit den beiden Teilen 2 verbunden. Zusammengenommen bilden sie den Körper einer Kohlebürste, dessen Bohrloch, von der vorderen Seitenwand gesehen, der Länge nach zugänglich ist. Zusammen mit dem Teil 3, dem „Gegendruckkörper“, wird die Grundform einer Prüfkohle verschlossen. Während der Grundkörper als feste Einheit auch aus einem Stück gefertigt sein kann, ist der Gegendruckkörper lose und wird beim Zusammensetzen der Prüfkohle mit einem Bügel in seiner Lage fixiert. Zwischen diesem Bügel und der Fixierung kann ein Drucksensor befestigt werden.

Es ergibt sich so ein Kohlekörper, der eine Bohrung aufweist, wobei die Druckwirkung in Richtung eines Teils des so gebildeten Zylinders mit einem Drucksensor messbar ist. Die Bohrung muss nun noch auf einer Seite verschlossen werden, wozu ein Dorn mit einer Platte als „Gegendruckstempel“ dient. Mittels einer Halteplatte kann auch hier ein Drucksensor fixiert werden. Damit können die senkrecht in Stampfrichtung wirkenden Kräfte gemessen werden. Dabei wird durch Ausformung von erhabenen Druckflächen sichergestellt, dass ausschließlich die aktive Fläche der Sensoren den auftretenden Kräften ausgesetzt werden.

Der für die Versuche ausgewählte druckabhängige Sensor ist in Schichten aufgebaut: eine Polymerfolie ist mit einem Netz von Elektroden versehen, eine andere mit einem Halbleitermaterial bedeckt, wobei die gesamte Dicke kleiner als 1 mm ist. Die aktive Fläche beträgt etwa 37 mm^2 . Einem Druck von 0,007 bar auf diese Fläche entspricht dabei einem Widerstand in der Höhe von $10 \text{ M}\Omega$, einem Druck von 7 bar auf diese Fläche einem Widerstand vom $1 \text{ k}\Omega$. Der Zusammenhang zwischen Kraft und Widerstand wird vom Hersteller des Sensors in Form einer Kurve angegeben. Die Widerstandswerte werden in einer Messschaltung verstärkt und die gemessenen Signale für die Auswertung aufgezeichnet. In der Abbildung 4.9 ist der Drucksensor gezeigt.



Abb. 4.9: Halbleiter Drucksensor

Es wird der Einfachheit halber dabei unterstellt, dass die radial auftretenden Kräfte in alle Richtungen betragsmäßig gleich groß sind. Dann kann, wenn der „Öffnungswinkel“ des Gegendruckkörpers (Teil 3) im Winkel 90° hergestellt worden ist, die Radialkraft nach der Formel

$$F_{RES} = \int_{-\frac{\pi}{4}}^{+\frac{\pi}{4}} F_{rad} \cdot \cos(\alpha) \cdot d\alpha = F_{rad} \cdot \sqrt{2} \Rightarrow F_{rad} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot F_{RES} \quad (4.12)$$

berechnet werden. F_{RES} ist die gemessene resultierende Kraft, F_{rad} sind die radial wirkende Komponenten. Weiters wird angenommen, dass die Kraftübertragung verlustfrei erfolgt, so dass insbesondere die Reibungsverluste vernachlässigt werden dürfen.

Zur Überprüfung des Modells auf seine Tauglichkeit wurde ein sehr einfacher Versuchsaufbau gewählt, der in der Abbildung 4.10 gezeigt ist. Im wesentlichen besteht der Versuchsaufbau aus einer Grundplatte mit einem Winkel, an den senkrecht zur Platte ein Kunststoffrohr befestigt ist. Dieses Kunststoffrohr dient als Führung für ein zylindrisches Metallstück das, im Rohr geführt, auf die Probe fallen gelassen wird. Bohrungen im Rohr und ein Haltestift erlauben unterschiedliche Fallhöhen und damit unterschiedliche Schlagenergie.

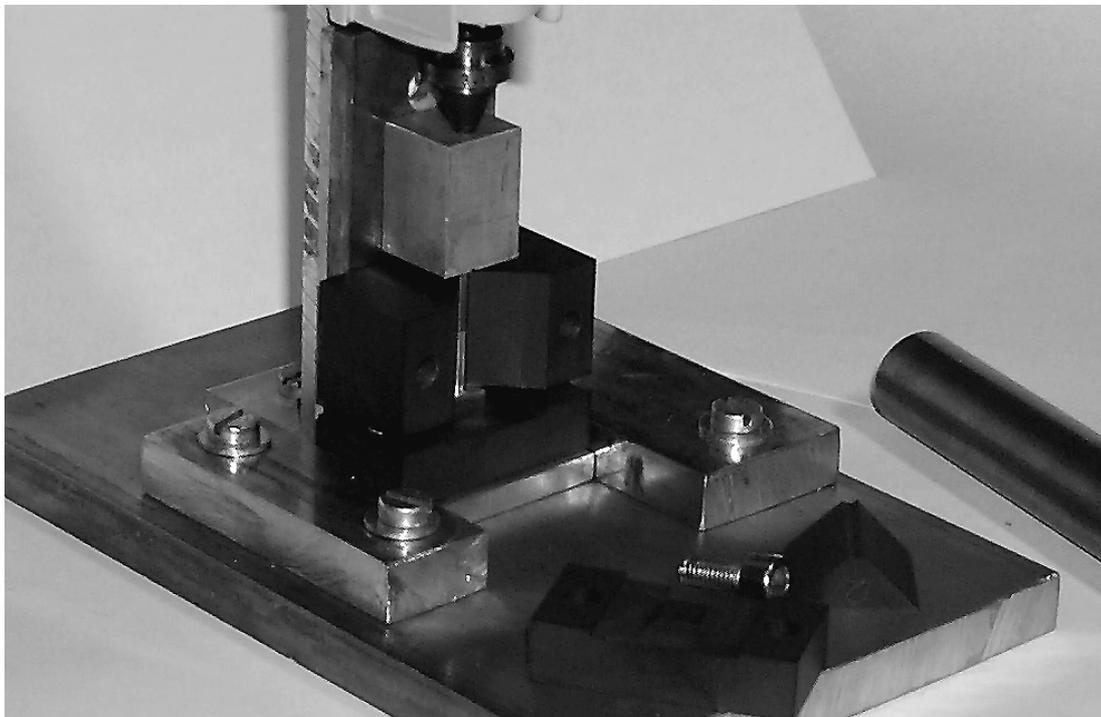


Abb. 4.10: Versuchsaufbau zur Kräftebestimmung

Im Vordergrund ist die Gegendruckplatte mit der Fräsung der Auflagefläche für den Sensor zu sehen. Diese Gegendruckplatte drückt den daneben liegenden Gegendruckkörper gegen das Bohrloch, der Sensor wird dazwischen eingespannt. Dahinter sind die weiteren Bestandteile der Prüfkohle zu sehen. Die Kohle selbst wird mit den Metallblöcken in ihrer Lage fixiert.

Für den Versuch kann eine zylindrische Masse - aus unterschiedlichen Höhen fallen gelassen - entlang des Rohres gleiten und auf ein durch einen Alublock geführtes Stampfröhrchen¹² aufschlagen. Wird mit dem Auslösestift entriegelt, fällt die Prüfmasse auf das Plättchen. Aus der Fallhöhe kann die Geschwindigkeit abgeschätzt und damit die Schlagenergie errechnet werden.

Für die Messschaltung kann ein einfacher Widerstandsteiler verwendet werden: der Sensor und ein fester Widerstand teilen die angelegte konstante Spannung. Die am festen Widerstand abfallende Spannung wird gemessen und mittels eines Oszillographen aufgezeichnet. Hauptzweck dieser Tests war es, Wertebereiche zu finden und diese aufzuzeichnen. Folgt man den Angaben des Herstellers des Sensors, ist in jedem Fall ein geeigneter Verstärker aufzubauen. Dennoch sind die so gewonnenen Ergebnisse interessant.

4.5.2 ERSTE VERSUCHE

Bei den Versuchen wurde die Aufzeichnung der gemessenen Spannung mit der Prüfkohle ohne Pulverfüllung vorgenommen. Nach dem Aufprall auf das Stampfrohr schlug die Masse durch Prellen mit kleiner werdender Amplitude mehrmals auf das Stampfrohr auf. Daher wurde zur Dämpfung der Fallbewegung eine ca. 2 mm starke Styroporplatte zwischen Stampfrohr und Masse als eine Art Polster zur Dämpfung angebracht. Abbildung 4.11 stellt die Aufzeichnung für einen Fall einer Masse von 198 g aus einer Höhe von 200 mm dar.

¹² In unserem Fall ein sogenanntes „volles“ Stampfrohr, das zum Verschießen von Bohrungen gedacht ist und keine Bohrung für das Kabel besitzt.

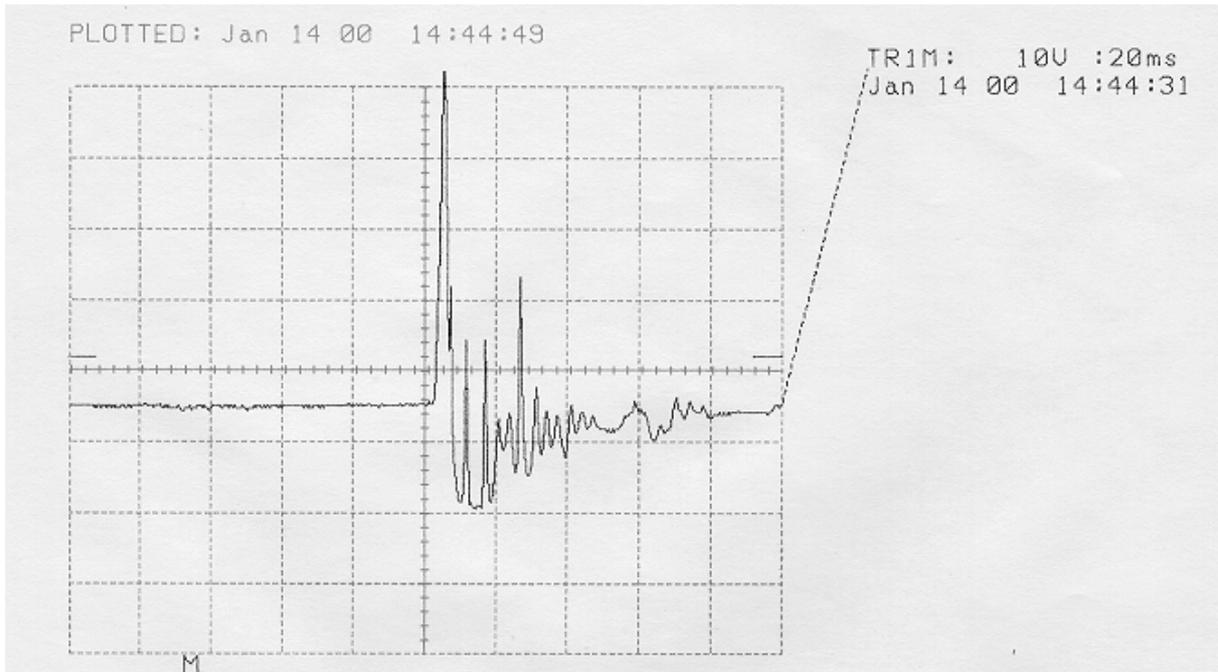


Abb. 4.11: Aufzeichnung einer Fallbewegung aus 200 mm Höhe

Das Ergebnis zeigt eine Kurve, die mit einem Seismogramm verglichen werden kann. Weitere Fallversuche aus unterschiedlichen Höhen brachten keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse. Sie bestätigten jedoch die Empfindlichkeit der Versuchsanordnung. So waren auch die Krafteinwirkung einer Masse kleiner als 1 Gramm (mit einer Briefwaage nicht bestimmbar) aus einer Fallhöhe vom 400 mm nachweisbar. Dennoch könnte man erwarten, dass der angezeigte Signalpegel nach dem Versuch höher ist als vorher. Aus der obigen Aufzeichnung ist das nicht ersichtlich. Weiters ist die Widerstandsänderung entsprechend der Kennlinie nur in Richtung kleiner werdender Widerstände erwartet worden, die Aufzeichnung zeigt jedoch auch ein Unterschreiten der Messspannung bezogen auf das Ruhesignal.

Zur Beantwortung der Frage, ob die Aussicht besteht, Gewichtskräfte nachzuweisen und mit einer verbesserten Versuchsanordnung und geeigneten Messschaltungen Werte für die Bestimmung von Kräften oder Kräfteverteilungen zu erhalten, wurde eine Masse vorsichtig mit der Hand auf die Messeinrichtung gestellt. Dabei sollte die bleibende Änderung der Gewichtskraft durch die ruhende Masse festgestellt werden. Das Ergebnis dieses Versuches ist in Abbildung 4.12 gezeigt.

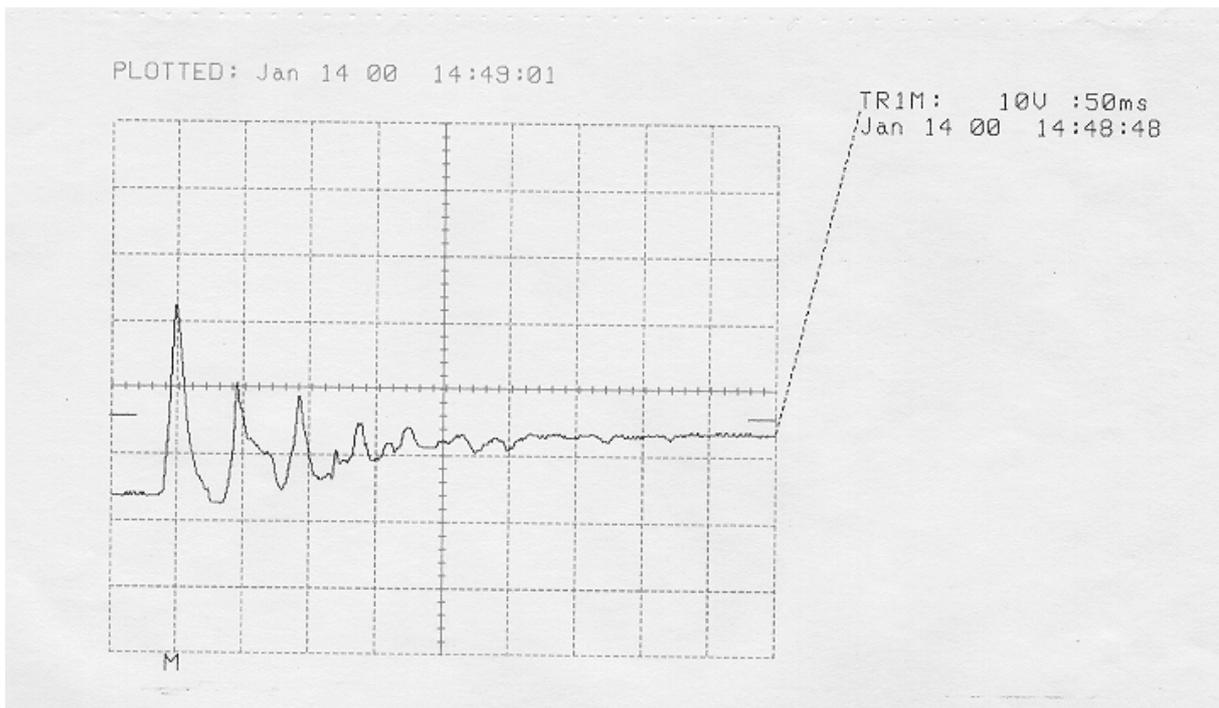


Abb. 4.12: Statisches Aufsetzen einer Masse

Auch Abb. 4.12 zeigt einen Einschwingvorgang, jedoch mit wesentlich geringeren Spitzen. Hier ist jedoch die erwartete bleibende vertikale Auslenkung festzustellen.

Eine Weiterentwicklung dieser Versuchreihe ist nicht vorgesehen. In erster Linie liegt die Ursache dafür in nicht zur Verfügung stehenden Mitteln.

4.6 MODELL DES STAMPFKONTAKTES

Der Stampfkontakt besteht aus einem annähernd zylindrischen Körper aus verdichtetem Stampfpulver, der die stromzuführende Leitung umschließt. In der Abbildung 4.13 ist das vereinfachte¹³ Modell dargestellt.

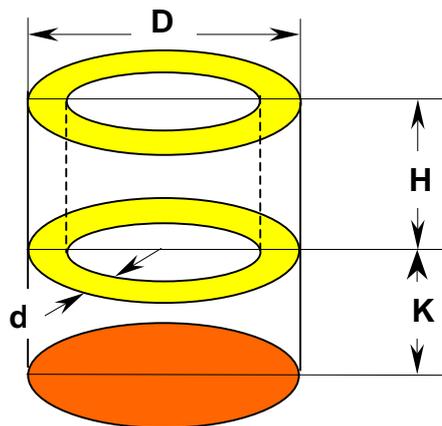


Abb. 4.13: Modell des Stampfkontaktes

In dieser Skizze bedeuten:

- Höhe der Stampfung: H , bestehend aus n Verdichtungsschritten (Pulverlagen)
- Knotenhöhe: K
- Höhe des Stampfkontaktes: $H + K$
- Dicke des Stampfpulvers: d
- Durchmesser der Bohrung: D

Das Kabel wird beim Einführen in die Bohrung gestaucht und bildet eine Verdickung, die Knoten genannt wird¹⁴. Die Knotenhöhe wird durch Herstellungsvorschriften bestimmt und ergibt sich aus der Überlänge des aus dem Stampfröhrchen herausragenden Kabels. Typisch ist eine Knotenlänge von 1 mm. Durch die Knotenbildung existiert am unteren Ende des Stampfkontaktes eine Kontaktfläche zwischen Kabel und Kohlebürste.

Durch den Stampfvorgang wird auch der Knoten weiter zusammengesoben. Jede Pulverfüllung wird auf etwa die Hälfte des lose geschütteten Pulvers verdichtet, so dass ein "Pulverring" nach dem anderen zu einem Zylinder der Höhe H

¹³ Der Bohrer ist an der Spitze meist kegelig angeschliffen.

¹⁴ Es gibt auch Stampfkontakte, die ohne Knoten hergestellt werden. Diese Kontaktart ist seltener in Verwendung.

zusammengesetzt wird, in dessen Kern das Kabel mit dem Durchmesser $D - 2d$ geführt ist. Der Kontaktübergang Kabel - Stampfkontakt ist die Innenfläche des Hohlzylinders, die Aussenfläche bildet den Kontaktübergang zur Kohlebürste.

Der Widerstand des Stampfkontaktes setzt sich zusammen aus dem Widerstand des Knotens und den parallel geschalteten Widerständen des Kabels und der Pulverfüllung. Mit Hilfe der Formel 1.5 lassen sich die einzelnen Widerstände und daraus der gesamte Widerstand errechnen. Es gilt für einen Knoten mit den gegebenen Abmessungen

$$R_{Kn} = \frac{4 \cdot \rho_{Kabel} \cdot K}{D^2 \cdot \pi} \quad [\Omega] \quad (4.13)$$

und für den gestampften Bereich und das Kabel

$$R_{St} = \frac{4 \cdot \rho_{Pulver} \cdot H}{(D^2 - (D - 2 \cdot d)^2) \cdot \pi} \quad [\Omega], \quad R_{Ka} = \frac{4 \cdot \rho_{Kabel} \cdot H}{(D - 2 \cdot d)^2 \cdot \pi} \quad [\Omega] \quad (4.14)$$

Der gesamte Widerstand des Modells ergibt sich zu

$$R_{ges} = R_{Kn} + \frac{R_{St} \cdot R_{Ka}}{R_{St} + R_{Ka}} \quad [\Omega] \quad (4.15)$$

Nach kurzer Zwischenrechnung erhält man für den Gesamtwiderstand

$$R_{ges} = \frac{4 \cdot \rho_{Kabel} \cdot K}{D^2 \cdot \pi} + \frac{4 \cdot \rho_{Pulver} \cdot \rho_{Kabel} \cdot H}{\rho_{Pulver} \cdot (D - 2 \cdot d)^2 \cdot \pi + \rho_{Kabel} \cdot (D^2 - (D - 2 \cdot d)^2) \cdot \pi} \quad [\Omega] \quad (4.15)$$

Im folgenden Beispiel soll der Widerstand eines Stampfkontaktes zur Abschätzung seiner Größenordnung entsprechend Abb. 4.14 berechnet werden.

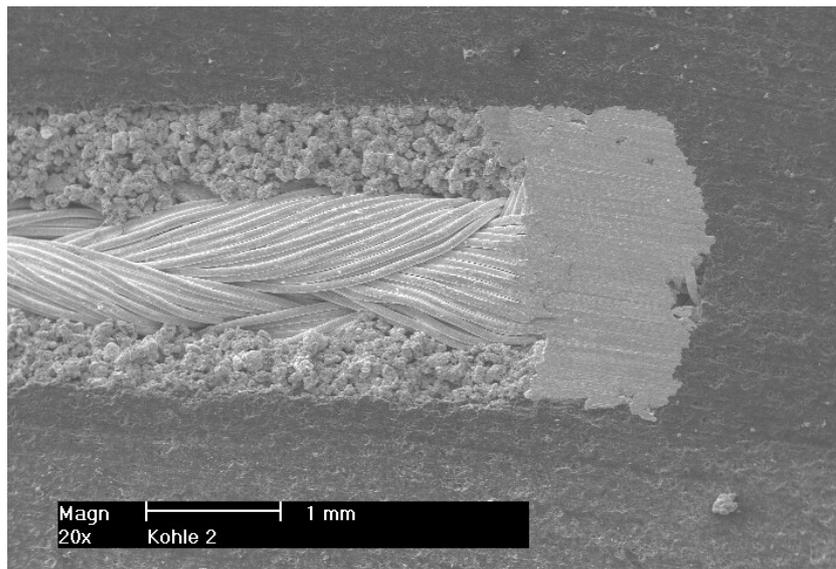


Abb. 4.14: Stampfkontakt (Schnitt)

Abbildung 4.14 zeigt einen angeschliffenen Stampfkontakt einer Kleinkohle. Deutlich erkennbar sind die Bereiche Knoten, Stampfung und Kupferkabel. Der eingblendete Maßstab dient dem Größenvergleich. Bekannt sind folgende Werte:

- Höhe der Stampfung: $H = 4,5 \text{ mm}$
- Knotenhöhe: $K = 1,32 \text{ mm}$
- Dicke des Stampfpulvers: $d = 0,5 \text{ mm}$
- Durchmesser der Bohrung: $D = 2,2 \text{ mm}$
- $\rho_{\text{Kabel}} = 0,0155 \text{ } [\mu \Omega / \text{m}]$
- $\rho_{\text{Pulver}} = 0,025 \text{ } [\mu \Omega / \text{m}]$

Setzt man die Werte in Formel 4.15 ein erhält man

$$\begin{aligned}
 R_{\text{ges}} &= \frac{4 \cdot 0,0155 \cdot 1,32 \cdot 10^{-3}}{(2,22 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi} + \\
 &+ \frac{4 \cdot 0,025 \cdot 0,0155 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3}}{0,025 \cdot ((2,22 - 1) \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi + 0,0155 \cdot ((2,22 \cdot 10^{-3})^2 - ((2,22 - 1) \cdot 10^{-3})^2) \cdot \pi} = \\
 &= 5,31 \text{ } [\mu \Omega]
 \end{aligned}$$

Der Widerstand dieses Stampfkontaktes ist sehr klein. Messtechnisch kann er nicht direkt erfasst werden. In den später gezeigten Messvorschriften wird ein sogenannter Übergangswiderstand definiert, bei dem auf Grund der Messvorschrift auch Teile der Kohlebürste in die Messung mit einbezogen werden.

5. VERSUCHE UND MESSUNGEN

Zur Sicherung spezifizierter Eigenschaften sind Messungen an fertigen Produkten in jeder Produktion notwendig. Neben den qualitätssichernden Maßnahmen werden in diesem Abschnitt auch Messungen und Messmethoden beschrieben, die Vorgänge beim Stampfprozess untersuchen.

Verwendet werden Kohlematerialien, die auf Grund ihres Herstellungsprozesses unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Festigkeit und elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Dazu kommen bei der Herstellung des Stampfkontaktes noch Einflüsse aus vorhergehenden Arbeitsschritten und Materialeigenschaften, wie die Vorbehandlung der Bohrung, die verwendeten Stampfpulver und das Kabel.

Zunächst sollen die Bewegungsabläufe untersucht werden. Zur Erzeugung der Bewegung wird mittels dosierter Luftimpulse eine senkrecht oszillierende Bewegung erzeugt. Die Luftimpulse werden durch ein rotierendes Ventil, dem Drehschieber, hergestellt. Mit der Weiterentwicklung von Magnetventilen wurde es möglich derartige Impulse auch mit Hilfe schnell schaltender Ventile zu erzeugen. Wir werden die dabei auftretenden Unterschiede und Probleme weiter unten diskutieren, da diese Art der Luftimpulserzeugung speziell bei Neuentwicklungen erfolgversprechend ist.

Das Verständnis der Wirkungsmechanismen beim Drehschieber ist notwendig, um die Einflussgrößen beim Stampfvorgang aufzuzeigen. Daher werden wir unser Interesse zunächst diesem Bauelement zuwenden.

5.1 LUFTIMPULSERZEUGUNG DURCH DEN DREHSCHIEBER

Wie oben festgestellt erzeugt der Drehschieber die antreibenden Luftimpulse für den Stampfzylinder. Die daraus folgenden Bewegungsabläufe werden dem theoretische Bewegungsablauf gegenübergestellt.

Der Drehschieber wirkt als Ventil, wobei im Gegensatz zu üblichen Ventilen die Betätigung durch einen Elektromotor erfolgt. Dabei ist das Verhältnis Ventil „offen“ bzw. „geschlossen“ einerseits durch Ausfräsung von Kanälen in einem zylindrischen Grundkörper, andererseits durch die Drehzahl des Antriebes bestimmt. Die Wirkungsweise des Drehschiebers ist mit der Funktion eines 2/3 Wege-Ventils

vergleichbar, wodurch sogenannte einfach wirkende Zylinder angesteuert werden können.

Als Hilfsmedium für den angesteuerten Zylinder ist Luft vorgesehen. Bei geöffnetem Drehschieber wird Luft in einen Zylinder geleitet, bei geschlossenem Zuluftkanal des Drehschiebers wird der Zylinder entlüftet. Bedingt durch die Konstruktion des betrachteten Drehschiebers (Fabrikat der Fa. *Uherek*) ergibt sich eine teilweise Überschneidung der Zeitpunkte für die Belüftung bzw. Entlüftung des angeschlossenen Zylinders.

Den folgenden Ausführungen sind Skizzen der Fa. *Uherek* zugrundegelegt, die einerseits eine Schnittzeichnung des Drehschiebers (Abb. 5.1) und andererseits die Lage der Sensoren für die Abfrage der Stellung des Drehschiebers darstellen.

Aus dieser gezeigten Skizze „Schnitt des Drehschiebers“ können für die Zustände Drehschieber offen bzw. geschlossen folgende Werte angenähert¹ abgelesen werden. Als Bezugspunkt wird die in beiden Zeichnungen angegebene Passfeder der Antriebsscheibe angenommen und mit 0° festgelegt, die abgelesenen Winkelangaben beziehen sich auf die im Uhrzeigersinn² gerichtete Drehrichtung des Drehschiebers für die Hauptkanäle (Tabelle 5.1).

Zustand (Hauptkanäle)	Winkel in °
Ausfräsung für die Belüftung	0 bis 75
keine Fräsung	75 bis 90
Ausfräsung für die Entlüftung	90 bis 270
keine Fräsung	270 bis 300
Ausfräsung für die Belüftung	300 bis 0

Tab. 5.1: Drehschieber Hauptluftkanäle

¹ Für eine genauere Untersuchung sind die detaillierten Fertigungsunterlagen mit allen Angaben notwendig. Zum Verständnis der Untersuchung sind diese Angaben jedoch nicht erforderlich.

² In der Zeichnung ist der Schnitt der Welle in der Ansicht von hinten dargestellt. Daher muss die Ablesung der Winkel gegen den Uhrzeigersinn vorgenommen werden.

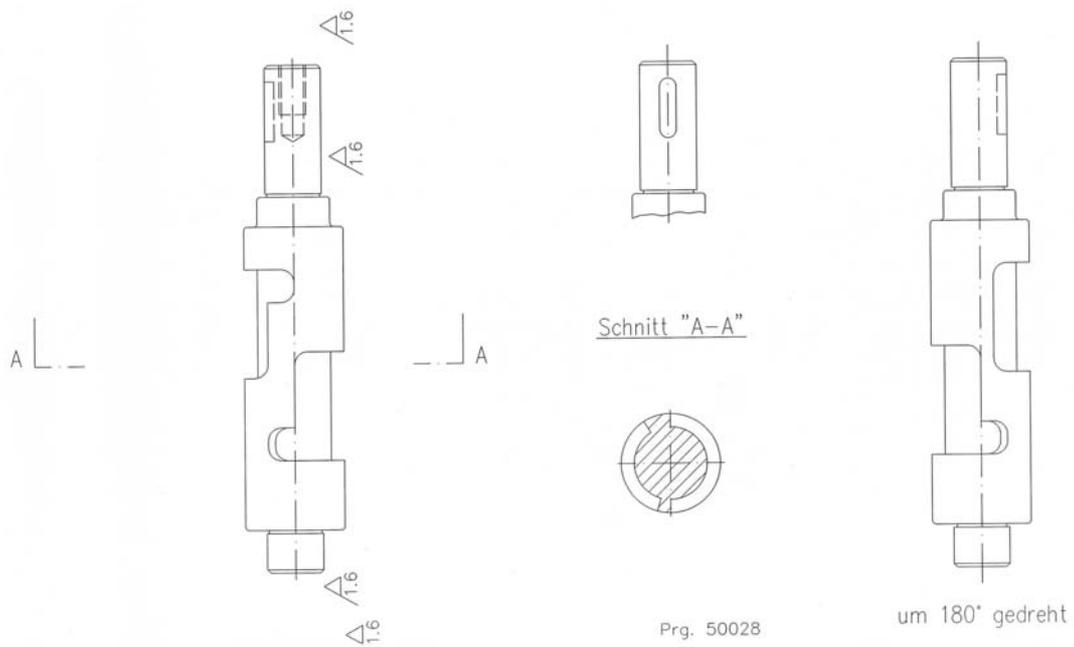
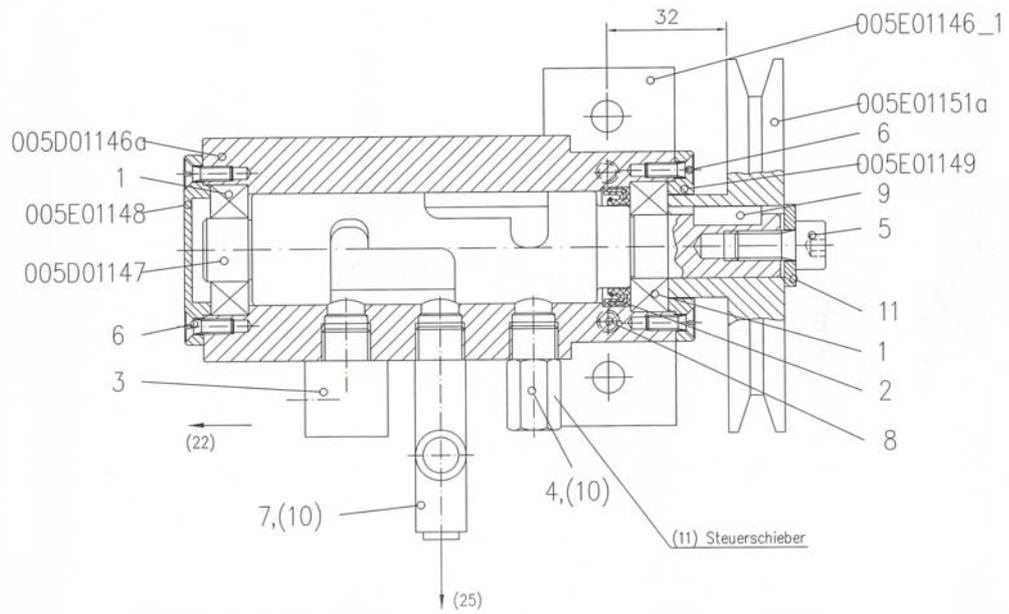


Abb. 5.1: Drehschieber Hauptluftkanäle

Aus der Zusammenstellungszeichnung sind die Lufteinlassbohrungen dargestellt. Man kann den Bohrungsdurchmesser in ein Verhältnis zum Umfang der Welle setzen, wobei beim Vorbeidrehen ein Drehwinkel von etwa 15-25° überstrichen werden muss, um entweder die Bohrung voll freizugeben oder zu schließen. In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 5.2) werden für diese Übergänge Drehwinkel von 20° angenommen. Zusätzlich sind weitere Ausfräsungen vorhanden, die teilweise die Kanäle früher freigeben bzw. später schließen. Man kann als Näherungswert aus der Skizze dafür einen Winkel von 30° ablesen. Bezeichnet man in Anlehnung an die Skizze „Schnitt des Drehschiebers“ die Anschlüsse mit **V** (Zuluft vom Ventil kommend, Pos. 4 in der Zeichnung), **S** (Stampfen, Pos. 7, 10 in der Zeichnung) und **E** (Entlüftung, Pos. 3 in der Zeichnung) und führt bei der größtmöglichen Öffnung der Kanäle für V bzw. für E Hilfsschnitte ein, ergeben sich folgende Winkel, die unten in Tabelle 5.2 (Analyse des Drehschiebers) zusammengefasst sind.

Bezieht man die festgestellten Werte der Tabellen 5.1 und 5.2 auf das Verhalten bei der Bewegung des Zylinders, wobei der Durchmesser der Bohrungen für die Lufteinlässe bezogen auf den Drehschieber einen Winkel von etwa 20° angenommen worden sind, ergibt sich der Druckaufbau durch die zugeführte Versorgungsluft im Bereich von 290° bis 310°, der volle Zufluß im Bereich von 310° bis 60° und Unterbrechung des Zuflusses im Bereich von 85° bis 290° bzw. der Druckabbau durch Entlüftung im Zylinder in der Phase des Öffnen der Entlüftungsleitung im Bereich von 60° (Beginn des Öffnen) bis 80° (voll offen) über 260° (Beginn des Schließen der Verbindungsleitung zum Ventil) bis 280° (Ventilleitung wieder geschlossen) (Tab. 5.2).

Winkel in °	V	S	E	Anmerkung
0 bis 65	offen	offen	-	Belüftung des Zylinders
0 bis 60	offen	offen	zu	
60 bis 80	-	-	öffnet	Überschneidung
65 bis 85	schließt	schließt	offen	gemeinsamer Übergang (V, S)
80 bis 100	-	öffnet	offen	
ab 85	zu	-	offen	
100 bis 260	zu	offen	offen	Entlüftung
260 bis 280	zu	schließt	offen	Übergang (S)
bis 290	zu	-	offen	
290 bis 310	-	öffnet	-	Beginn der Belüftung
310 bis 360	offen	offen	zu	Belüftung des Zylinders

Tab. 5.2: Analyse des Drehschiebers

In der nachfolgenden Graphik sind diese Zusammenhänge dargestellt, wobei das Belüften des Zylinders sich durch die gemeinsam überdeckte Fläche aus Ventil und Stampfzylinder ergibt und analog auch das Entlüften. Dabei sind die Übergänge zwischen den Stellungen 1 (für voll geöffnet) und 0 (für voll geschlossen) linear angenähert (Abb. 5.2). Es werden dabei beide möglichen Drehrichtungen des Drehschiebers untersucht, da es sich im praktischen Betrieb herausgestellt hat, dass bei beiden Drehrichtungen Stampfkontakte hergestellt werden konnten. In der Abb. 5.2 sind die Schaltfolgen beim Drehen im Uhrzeigersinn, in der Abb. 5.3 die Schaltfolgen beim Drehen entgegen dem

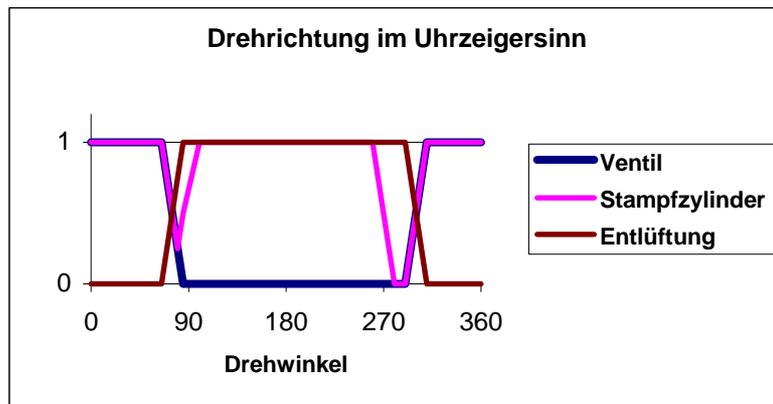


Abb. 5.2: Drehrichtung des Drehschiebers im Uhrzeigersinn

Uhrzeigersinn dargestellt, die gleichzeitig jener Drehrichtung entspricht, die vom Hersteller des Drehschiebers für den Betrieb geplant gewesen ist. In der Folge werden wir nur mehr diese Variante weiter behandeln.

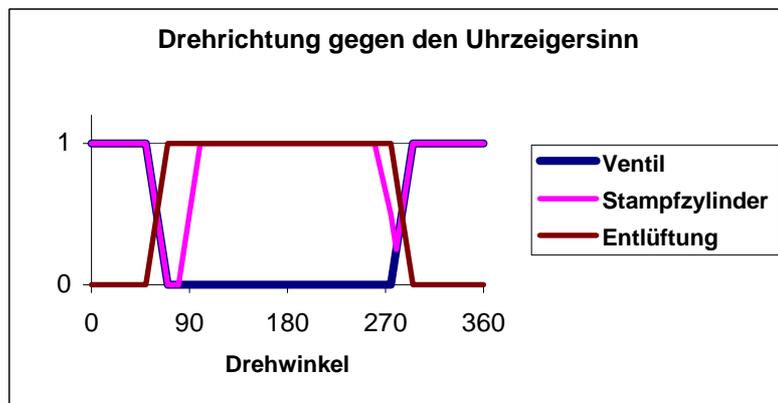


Abb. 5.3: Drehrichtung des Drehschiebers gegen den Uhrzeigersinn

Bei einigen Produktionsmaschinen ist das vorher beschriebene Schaltverhalten des Drehschiebers überprüft worden. Dazu wurde der Drehschieber mit Druckluft versorgt und dann durch Verdrehen dieses Ventils mit der Hand bei gleichzeitigem Ablesen der Drehwinkel für Belüftung das Ein bzw. Aus Verhalten bezüglich des Luftdurchlasses aufgenommen (Tab. 5.3). Als Bezugspunkt wurde die Stellung einer vorher festgelegten Markierung verwendet, die bei allen Maschinen gleichartig angeordnet worden ist.

Maschine Nr.	Ein	Aus	Differenz, Winkel in °
BSL 3	- 6	154	160
BSL 4	0	165	165
BSL 5	27	176	149

Tab. 5.3: Belüftung (Drehschieber)

Zunächst fällt bei den abgelesenen Werten aus Tab. 5.3 auf, dass es Differenzen gibt, die durch Ablesefehler alleine nicht erklärbar sind. Bezüglich der aus der Zeichnung entnommenen Werte ergeben sich für die volle Öffnung bei der Belüftung 115° zuzüglich der Übergänge, die wir mit 40° angenommen hatten. Insgesamt werden unsere theoretischen Werte bestätigt. Problematisch sind die verschiedenen Winkel für den Beginn und damit auch für das Ende des Luftdurchlasses. Dieser Punkt und die sich daraus ergebenden Probleme werden weiter unten behandelt.

Zuerst wollen wir einen zeitlichen Aspekt in die Überlegungen mit einbeziehen. Es ist klar, dass bei einer Produktionsmaschine unter anderem eine möglichst hohe Stückzahl erzeugt werden soll. Je nach Type der Kohlebürste sind unterschiedliche Anzahlen von Verdichtungsschlägen zur Erzeugung eines Stampfkontaktes notwendig. Ebenso ist die Schlagfrequenz zeitbestimmend. Für die folgende Überlegung ist eine Frequenz von 10 Schlägen³ pro Sekunde angenommen werden. In der folgenden Skizze wird die Zeit als Ordinate verwendet, daher werden wir die Winkelangaben in die äquivalente Zeit umrechnen.

Für die folgende Berechnung der Zeitverzögerung wurden für die Bewegungen die Formeln 1.24 bis 1.28 verwendet⁴. Zusätzlich wurde vereinfachend angenommen, dass der Druckanstieg linear der Öffnung des Ventils folgt. Die so ermittelten Werte sind in den Tabellen 5.4 bis 5.6 zusammengefasst. Die Zeitverzögerung

³ Typisch für die Fertigung sind Frequenzen zwischen 8 und 12 Hz.

⁴ Zusammen mit den dort festgelegten Parametern.

ergibt sich aus der Differenz von jener Zeit, die dem Ventil zuzuordnen ist und mit Hilfe des Winkels ermittelt worden ist und der berechneten Reaktion des Zylinders. Maschinenbezogene Einflüsse wurden dabei nicht berücksichtigt.

Druck [Pa]	Kraft [N]	Zeitverzögerung [ms]	Winkel=Zeit	Ventil
12500	1,924225	52,8818125	0,00020833	0,075
20000	3,07876	12,5859571	0,00027778	0,001
30000	4,61814	10,2159807	0,00041667	0,150
40000	6,15752	9,44236087	0,00055556	0,200
50000	7,6969	9,05481816	0,00069444	0,250
60000	9,23628	8,82148405	0,00083333	0,300
70000	10,77566	8,66544384	0,00097222	0,350
80000	12,31504	8,55369978	0,00111111	0,400
90000	13,85442	8,46971495	0,00125	0,450
100000	15,3938	8,40427958	0,00138889	0,500
110000	16,93318	8,35185503	0,00152778	0,550
120000	18,47256	8,30890934	0,00166667	0,600
130000	20,01194	8,27308354	0,00180556	0,650
140000	21,55132	8,24274177	0,00194444	0,700
150000	23,0907	8,21671385	0,00208333	0,750
160000	24,63008	8,19414055	0,00222222	0,800
170000	26,16946	8,17437667	0,00236111	0,850
180000	27,70884	8,15692831	0,0025	0,900
190000	29,24822	8,14141096	0,00263889	0,950
200000	30,7876	8,12752079	0,00277778	1,000

Tab. 5.4: Zeitverzögerung Zylinder

Aus der Tabelle 5.4 ist folgendes zu entnehmen: bei einem Druck in der Höhe von ca. 12500 Pa ist die Hubkraft größer als die Schwerkraft, der Stampfzylinder beginnt sich nach oben zu bewegen. Wird der Druck nicht weiter erhöht, benötigt er für die Überwindung der Hubhöhe⁵ die in der Spalte „Zeitverzögerung“ genannte Zeit, also etwa 52 ms. Die Zeitverzögerung des Zylinders ist in der folgenden Abb. 5.4 mit dargestellt. Bezogen auf den Anfangswert⁶ bedeutet die so ermittelte Zeit jenen Zeitpunkt, an dem die volle Öffnung für den Pulverfluss des Stampfpulvers freigegeben ist. Hier und auch in den folgenden Tabellen verwendeten Tabellenspalten „Winkel=Zeit“ in Sekunden wurden aus den oben ermittelten Werten für den Luftzufluss zum Stampfzylinder berechnet, wobei für die volle Umdrehung des Drehschiebers eine Zeit von 100 ms zugrunde gelegt sind, also eine Schlagfrequenz von 10 Hz. In der letzten Spalte „Ventil“ sind die

⁵ Angenommen ist eine für die Hubhöhe typische Höhendifferenz von 10 mm.

⁶ In der Abb. 5.4 wurde der Anfangswert Null gewählt.

zuhörige Werte beim Öffnen des Drehschiebers angegeben, wobei zur Vereinfachung ein lineares Verhalten angenommen worden ist.

Winkel=Zeit	Zylinder [bei konstantem Druck]
0,05309015	0,075
0,01286373	0,100
0,01063265	0,150
0,00999792	0,200
0,00974926	0,250
0,00965482	0,300
0,00963767	0,350
0,00966481	0,400
0,00971971	0,450
0,00979317	0,500
0,00987963	0,550
0,00997558	0,600
0,01007864	0,650
0,01018719	0,700
0,01030005	0,750
0,01041636	0,800
0,01053549	0,850
0,01065693	0,900
0,0107803	0,950
0,0109053	1,000

Tab. 5.5: Zeit-Zylinder

In der Tabelle 5.5 ist die gesamte Zeit für die Zylinderbewegung berechnet. Hier ist dargestellt, wie lange der Öffnungsvorgang dauert um bei konstantem Druck die volle Hubhöhe zu erreichen. In der Tabelle 5.6 sind die Werte für die Zylinderbewegung zusammengestellt.

Winkel=Zeit	Zylinderbewegung [1 = offen]
0,00020833	0,0
0,00534726	0,1
0,00641252	0,2
0,0072294	0,3
0,00791807	0,4
0,0085248	0,5
0,00907333	0,6
0,00945048	0,7
0,01004725	0,8
0,01048822	0,9
0,0109053	1,0

Tab. 5.6: Zylinderbewegung

Graphisch ist mit den Werten aus Tabelle 5.4 bis 5.6 die Drehschieberöffnung, die Zylinderbewegung und die Zeitverzögerung bei steigendem Druck in der Abb. 5.4 dargestellt.

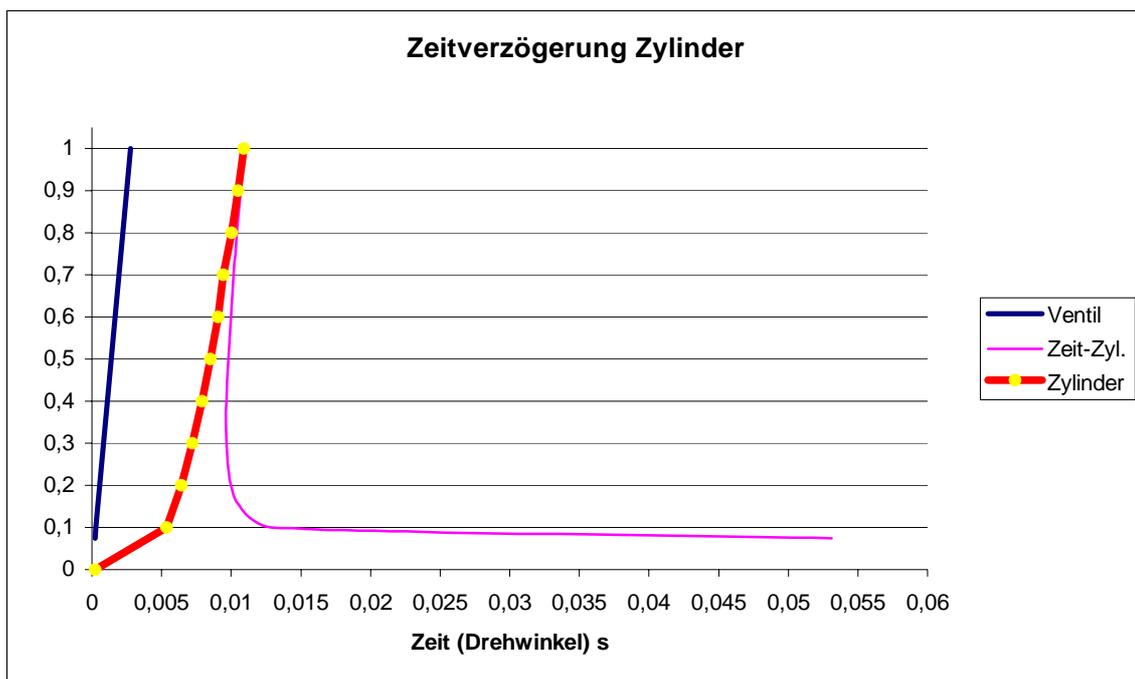


Abb. 5.4: Zeitverzögerung Ventil-Zylinder

Ähnlich wurde die Zeitverzögerung beim Ausschalten der Druckluft ermittelt. Da die Hubkraft wegfällt, wirkt nur mehr die Schwerkraft und bewegt den Stampfzylinder in seine untere Ruhelage. Es gelten dann die oben angeführten Formeln sinngemäß. Zum Zeitpunkt 27,7 ms ist die Entlüftung voll geöffnet. Hier wurde der Zeitpunkt des Beginns der Abwärtsbewegung in der Abbildung angenommen. Die Fallzeit entsprechend der Schwerkraft liegt bei 45 ms. In der Abbildung 5.5 sind diese Zusammenhänge graphisch dargestellt.

Fasst man beide Abbildungen zusammen ergibt sich ein Gesamtbild aus dem man folgendes abzulesen kann: die Fallbewegung setzt verspätet ein. Der Grund dafür ist, dass zwar das Ventil, also die Zuluft unterbricht, die Öffnung für die Entlüftung erst bei einem Drehwinkel von 80-100° öffnet. Das entspricht umgerechnet auf die Zeitskala bei der angenommenen Schlagfrequenz, dass zum Zeitpunkt 27,8 ms die Fallbewegung einzusetzen beginnt und im freien Fall etwa 45 ms benötigt, um die Wegstrecke von 10 mm zurückzulegen. Die durchschnittliche Hubverzögerung liegt, bedingt durch den Druckaufbau, bei rund 8 ms. Die antreibende Luft wird unter den gewählten Voraussetzungen zum Zeitpunkt 76 ms freigegeben, daraus folgt, dass für den Verdichtungsprozess nahezu keine Zeit zur Verfügung stehen.

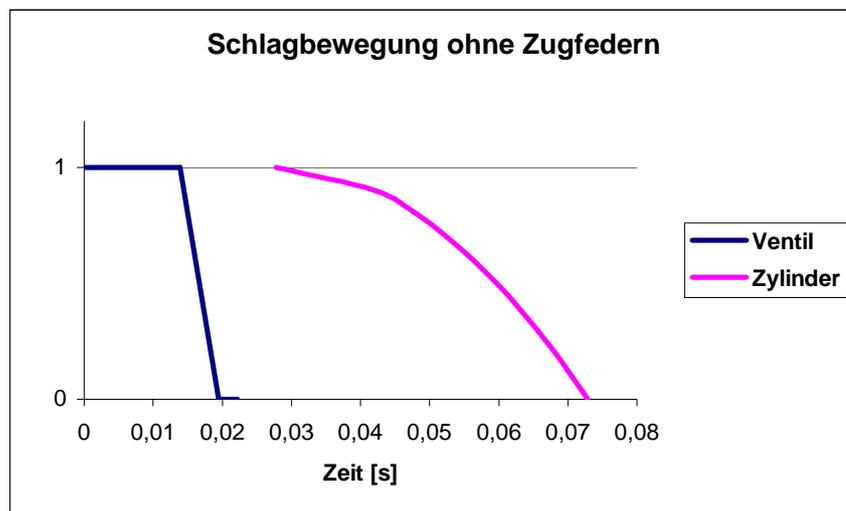


Abb. 5.5: Schlagbewegung ohne Zugfedern

Auch um das Zeitverhalten zu beeinflussen, werden Zugfedern verwendet. Festzustellen ist, dass ohne Verwendung von Zugfedern eine Zeitschranke existiert, die bei Überschreitung einer Schlagfrequenz größer 10 Hz nicht mehr

sicherstellt, dass eine Verdichtung des Stampfpulvers ordnungsgemäß erfolgen kann.

5.2 EINFLUSS DER ZUGFEDERN

Hier wird der Einfluss der Zugfedern zur Beschleunigung der Abwärtsbewegung untersucht.

Zur Verstärkung, aber fallweise auch zur Verminderung, der Schlagkraft werden Zugfedern eingesetzt. Erst seit wenigen Jahren wird diesen Federn erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet, insbesondere werden diese nun auch bezüglich ihrer Zugwirkung gemessen und geeicht. Notwendig geworden ist dies, weil auf Grund ihrer besonderen Eigenschaften die Zusammensetzung der Kohlebürsten durch Verwendung von weicheren Grundmaterialien weiterentwickelt worden ist. In den meisten Fällen werden die Federn jedoch paarweise zur Verstärkung der Schlagwirkung eingesetzt. Durch den paarweisen Einsatz kann die Zugwirkung auf den frei beweglichen Stampfzylinder gleichmäßig aufgeteilt werden und damit eine einseitige Belastung, die zu störenden Verlusten durch Reibung führen kann, klein gehalten bis vermieden werden. Für die folgende Betrachtung wird der Federsatz $2 \times 0,8$ mit einer gesamten Federkonstanten von $0,2 \text{ N/mm}$ herangezogen.

Zugrundegelegt werden die Überlegungen, die zur Abb. 5.5 geführt haben. In der folgenden Abbildung 5.6 wird der Einfluss der Federn auf das Bewegungsverhalten des Stampfzylinders gezeigt.

Die Verwendung von Federn entspricht der Betriebspraxis. Man erkennt, dass die Federn auf die Hubbewegung nur einen kleinen Einfluss zeigen, dass jedoch ihr Einfluss auf die Absenkbewegung deutlich sichtbar ist. Konsequenzen aus diesem Umstand werden weiter unten behandelt.

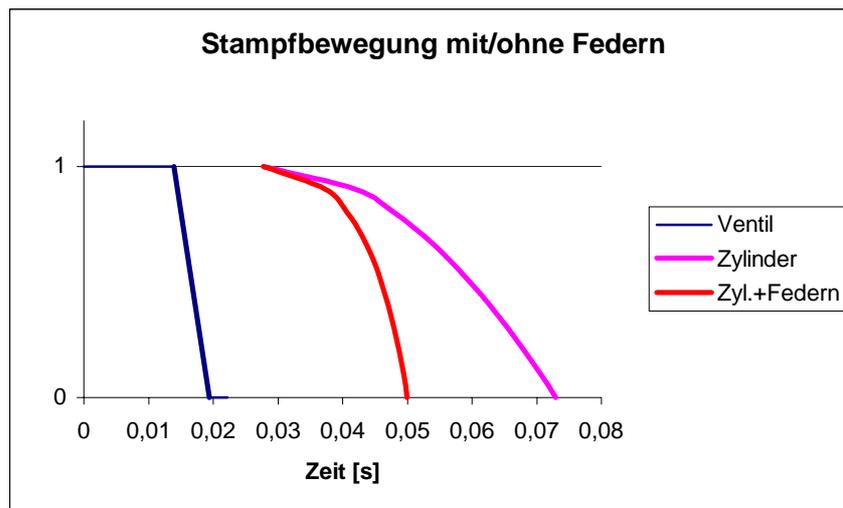


Abb. 5.6: Einfluss der Zugfedern

Zusammenfassend kann man an dieser Stelle bereits feststellen, dass bei der hier angenommenen Hubhöhe, Federkraft und dem Öffnungs- bzw. Schließverhalten des Drehschiebers der Zeitpunkt des Erreichens der unteren Endlage, also des Bodens der Bohrung in der Kohlebürste bei voller Hubhöhe um mehr als 20 ms früher erreicht wird.

Wird nun in einem Gedankenexperiment die Anzahl der Verdichtungsschläge langsam erhöht, existiert offenbar eine Schlagfrequenz, bei der die Zeit für die Entlüftung ohne Unterstützung der Bewegung durch die Zugkraft der Federn nicht mehr ausreicht. Die mögliche Schlagfrequenz besitzt also eine obere Schranke. Zusätzlich sind aber auch maschinenbezogene Einflüsse bestimmend, wie z.B. Reibung und andere. Diese Einflüsse sollen nun näher untersucht werden.

5.3 MESSUNG UND AUFZEICHNUNG DER BEWEGUNGSABLÄUFE

Die Bewegungen während des Stampfvorganges erfolgen so schnell, dass bei versuchsweiser Aufzeichnung der Bewegungsabläufe mit einer Videokamera keine brauchbaren Ergebnisse erzielt worden sind. Insbesondere zur Analyse der Vorgänge war diese Methode der Aufzeichnung nicht geeignet.

Die Idee, ein Längenmesssystem einzusetzen, scheiterte zunächst an mechanischen Gegebenheiten. Versuche mit der Verwendung eines optischen Sensors mit integriertem Analogausgang und Aufzeichnung der gemessenen Spannungswerte waren erfolgversprechend und wurden zum weiter unten beschriebenen Messaufbau erweitert.

Im Modell für das Stampfniveau ist das zeitliche Verhalten der Bewegungen des Stampfzylinders skizziert. Um den tatsächlichen Bewegungsablauf darstellen zu können wurden die Signale einer Messeinrichtung für die Längenmessung an einen Oszillographen angeschlossen (Abb. 5.7).

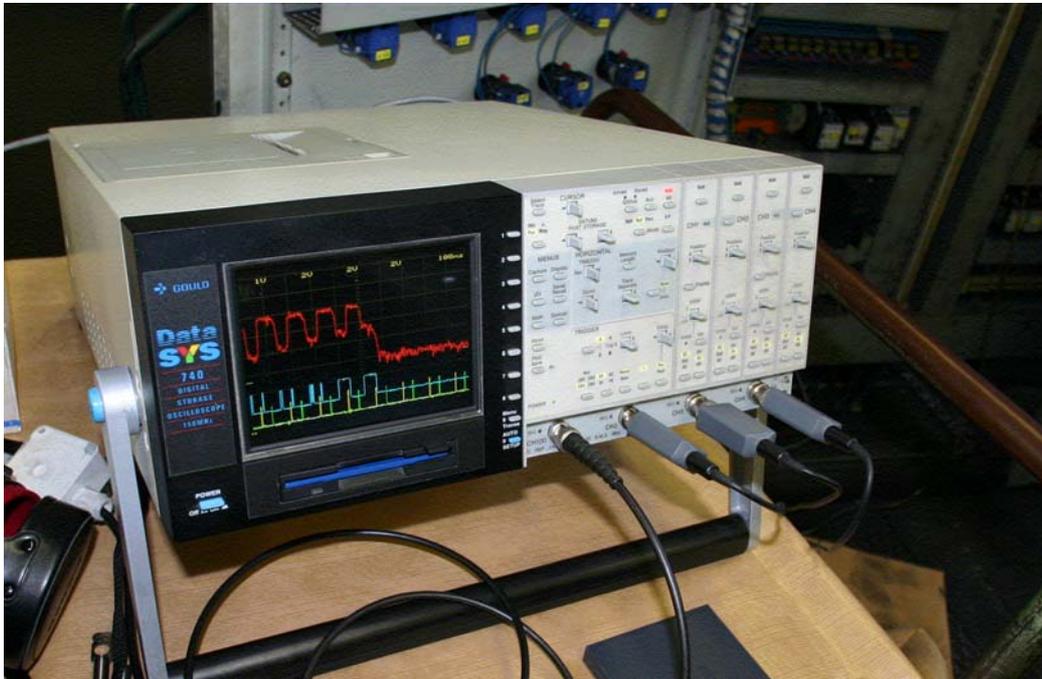


Abb. 5.7 Aufzeichnung von Messergebnissen mit einem 4 Kanal Oszillograph

Grundvoraussetzung für die Messung ist, dass die Messungen bei laufender Maschine derart durchgeführt werden können, dass die produktionsbestimmenden Einflüsse weitgehend unverändert bleiben. Da die bewegten Teile, die Stampfspindel mit dem antreibenden Kolben und dem Stampfwerkzeug, als Gesamtmasse in der Berechnung der umgesetzten Schlagenergie zu berücksichtigen sind, wurde eine Halterung aus Aluminium konstruiert, an der ein Reflektor für das optische Längenmesssystem befestigt ist. An den Auswerteteil, einem Verstärker, wird mit einem Glasfaser-Lichtleitkabel die Optik angeschlossen, welche die Bewegungen des Reflektors abtastet. Reflektor und Optik sind in einer Achse angeordnet. Während die Optik an einem Bügel fest mit dem Stampfkopf verbunden ist, wird während des Stampfvorganges der Reflektor bewegt. Diese Bewegung wird in einem Verstärker in ein elektrisches Spannungssignal umgesetzt.

Der Messaufbau und die Sensoren an der Maschine werden in der nachstehenden Abbildung an einer Weiterentwicklung des eingangs dargestellten Stampfkopfes gezeigt (Abb. 5.8).

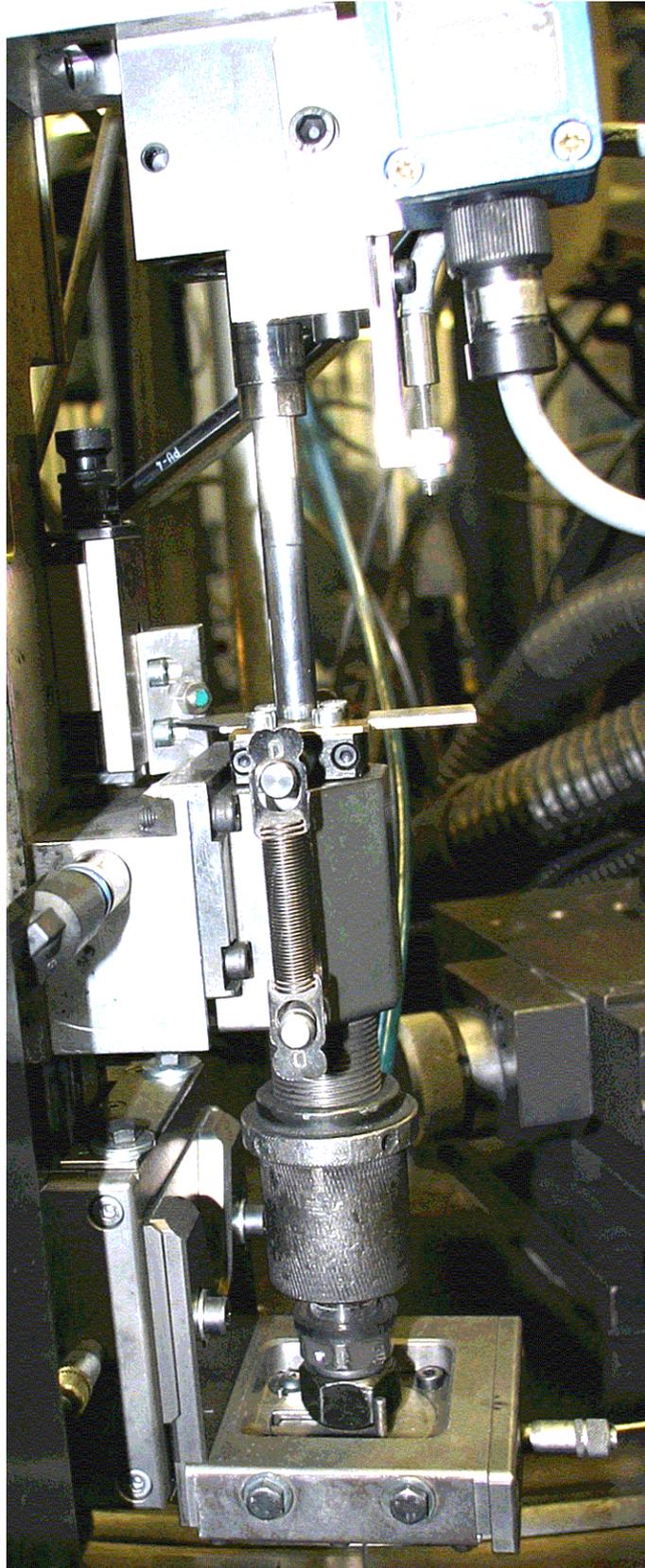


Abb. 5.8: Sensoren am Stampfkopf

Der Reflektor wird bei Bedarf an jenem Teil befestigt, an dem die Schaltfahne für den Niveauschalter befestigt ist. Diese Schaltfahne ist nur etwa 1 mm stark und so eingestellt, dass der Initiator für das Niveau auf Grund der Schaltkennlinie innerhalb einer sehr kleinen Höhendifferenz anspricht. Dadurch kann die maximal mögliche Pulvermenge begrenzt werden: beim vorletzten Schlag wird das Niveau noch nicht, bei letzten nicht mehr erreicht und in der Folge wird nicht abgeschaltet.

Vorab sei festgestellt, dass für die weiteren Betrachtungen nicht die Höhe der in Spannungssignale umgewandelten Messwerte interessant sind, sondern der zur Spannung proportionale zurückgelegte Weg. Für die genauen Betrachtungen werden diese Wegstrecken in Relation zum aufgezeichneten Signal gesetzt und den jeweiligen Bildern entnommen. Zur Bestimmung der Wege werden vertikale Abstände ermittelt, die einerseits durch den eingezeichneten horizontale Raster oder andererseits durch in die Aufzeichnung nachträglich eingefügte Hilfslinien gegeben sind. Die Zeiteinteilung ist bei den meisten Aufzeichnungen⁷ direkt am Bild ablesbar.

Zur Erläuterung ist in der folgenden Abbildung 5.9 ein Beispiel einer Aufzeichnung dargestellt. Ursprünglich wurden die aufgezeichneten Signale mittels eines eingebauten Plotters ausgedruckt und danach untersucht und ausgewertet. In der folgenden Abbildung ist ein Teilausschnitt einer Aufzeichnung dargestellt. Dabei entsprechen eine Rasterteilung horizontal (Zeitachse) 50 ms und eine Rasterteilung vertikal (Wegstrecke) ungefähr 2 mm.

Die Schlagfrequenz liegt bei diesem Beispiel bei etwa 12 Schlägen pro Sekunde⁸. Vergleicht man diese Aufzeichnung mit den weiter oben ermittelten theoretischen Werten, stellt man gute Übereinstimmung der Zeitverhältnisse Bewegung zu Ruhelage fest (in Abb. 5.8 liest man ein Verhältnis 30% Ruhelage zu 70% Bewegung ab, die berechneten Zeitpunkte für „Ende“ liegen bei ca. 50 ms und für „Anfang“ bei ca. 80 ms bezogen auf eine Frequenz von 10 Hz).

⁷ Ausgenommen sind jene Aufzeichnungen, die graphisch „zugeschnitten“ worden sind, um die Bildinformation deutlicher darstellen zu können. Wo es erforderlich ist, werden diese Informationen im Text erwähnt.

⁸ Dieser Wert kann aus den horizontalen Abständen der sich wiederholenden Bildabschnitten ermittelt werden.

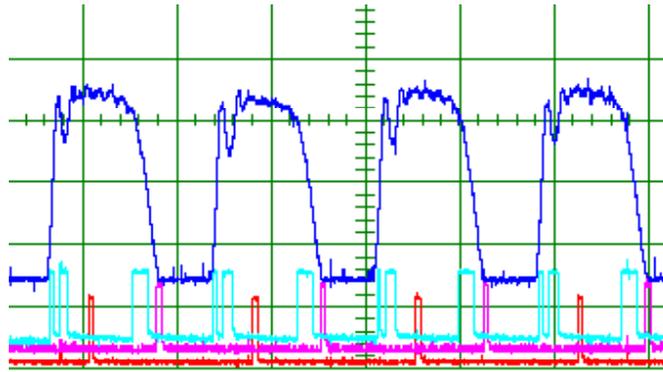


Abb. 5.9: Weg/Zeitdiagramm (Oszillograph)

In der Abbildung 5.9 ist bei einem vollen Hub jeweils nach dem Erreichen der oberen Hubbegrenzung ein deutlicher Rückprall dargestellt. Dieses Zurückfedern wird einerseits durch eine Blattfeder der im Abschnitt 1 beschriebenen „Glocke“ bewirkt (Hubbegrenzung), andererseits durch die ebenfalls dort beschriebene elastische Scheibe zwischen den Stampfrohr und dem oberen Anschlag. Die zusätzlichen Zacken in der aufgezeichneten Kurve sind auf mechanische Schwingungen und Vibrationen an der Maschine und durch elektrische Einstrahlungen bzw. Störungen in der Versorgungsspannung zurück zu führen.

5.4 DIE MESSEINRICHTUNG FÜR DIE AUFZEICHNUNG DER BEWEGUNGEN

In diesem Abschnitt werden die technischen Daten der verwendeten Messeinrichtungen vorgestellt.

5.4.1 DAS WEGMESSSYSTEM

Kern des Wegmesssystems ist die Kombination eines Reflexions-Lichttasters mit einer elektronischen Auswerteeinheit. Die Verbindung des Lichttasters zur Auswerteeinheit erfolgt über ein Lichtleitkabel aus einem Bündel von Glasfasen.

Der Tastkopf ist zusammen mit der Vorsatzoptik verbunden. Das hier verwendete Modell mit der Bezeichnung WRB 120S –M6 –2,5 ist geeignet, bei der Auswertung mit einem Analogverstärker Distanzen bis 50 mm zu erfassen (vgl. [DI04.0997]).

Für den Verstärker stehen wahlweise Varianten mit rotem, infrarotem und grünen Sendelicht zur Verfügung. Die hier verwendete Einheit der Type OLV 41 APK – IBS arbeitet mit Rotlicht und besitzt neben dem von uns nicht genutzten kurzschlussfesten Digitalausgang einen Analogausgang, der wahlweise über einen Stromausgang für 4 bis 20 mA oder den von uns bevorzugten Spannungsausgang

im Bereich von 0 bis 10 V verfügt. Sein Ausgangssignal wird direkt an einem Kanal unseres Oszillographen angeschlossen.

Die benötigte Hilfsenergie für den Verstärker wird bei Durchführung der Messung in der Regel direkt vom Schaltschrank der Maschine abgezweigt. Sowohl die Hilfsenergie als auch die Ausgangssignale werden an einer mehrpoligen Steckverbindung bereitgestellt. Das hier verwendete Kabel trägt die Bezeichnung VKHM – Z - 2,5/4 (vgl. [DI24.0998]).

Zur Befestigung an den unterschiedlichen Stapfmaschinen sind eine Reihe von Befestigungsteilen entwickelt worden, wie Halterungen, Befestigungswinkel und andere. Für den Lichttaster existiert eine einstellbare Halterung, damit mit einer Lehre der Abstand Reflektor – Sensor für alle Messungen mit der notwendigen Wiederholgenauigkeit eingestellt werden kann.

5.4.2 DER OSZILLOGRAPH

Das für die hier beschriebenen Messungen verwendete Messgerät der Fa. *Gould* der Type DataSYS 700 ist ein Oszillograph mit der Möglichkeit zur Speicherung von Signalen, Geräteeinstellungen oder Testsequenzen. Die folgenden technischen Angaben sind der Bedienungsanleitung entnommen (vgl. [Gou700]).

Für die Anzeige steht ein LCD-Farb-Bildschirm mit einer Bildschirmdiagonale von 6 Zoll und einer Auflösung von 501 x 256 Bildpunkten zur Verfügung. Für die Farben stehen getrennte Regelmöglichkeiten für die Strahlen, den Raster, die X-Y Anzeige und andere zur Verfügung.

Die Empfindlichkeit der internen DC-Kopplung bzw. AC-Kopplung ist mit 150 MHz beschränkt. Die maximale Messgeschwindigkeit ist 100 Ms/s⁹ und gleichzeitig auf allen vier Kanälen erreichbar. Die Ablesegenauigkeit wird mit besser $\pm 2 \% \pm 1$ LSB¹⁰ angegeben. Die über die Kanäle abgetasteten Eingangsspannungen sind in 1-2-5 Schritten wählbar. Der gewählte Spannungsbereich ist auf den Aufzeichnungen¹¹ vermerkt.

⁹ Ms/s mega samples per second

¹⁰ LSB least significant Bit

¹¹ Im rechten oberen Bildbereich. Fallweise wurde dieser Bereich bei einigen Abbildungen weggelassen

In erster Linie wurde als Anzeigart die Funktion „Roll“ gewählt. Dabei werden die gespeicherten Daten und die Anzeige von rechts nach links verschoben und bei den Zeitablenkungen zwischen 50 ms/Skalenteil bis 200 s/Skalenteil fortlaufend aktualisiert. Um den gewünschten Bildausschnitt einer Anzeige zu erreichen, wird die Funktionstaste „Hold ALL“ betätigt. Dadurch wird das gerade angezeigte Bild eingefroren und kann weiter bearbeitet werden.

Bei den beschriebenen Aufzeichnung war die Vorgehensweise normalerweise so, dass nach einer ersten Sichtkontrolle eines Bildes dieses entweder verworfen, gespeichert bzw. ausgedruckt worden ist. Verworfen und die Messung wiederholt wurde, wenn z.B. ein interessierender Teil nicht erfasst werden konnte. Speicherung auf Diskette zur späteren Auswertung erfolgte, um Bilder analysieren und auszuwerten. Mit dem zur Verfügung stehenden Plotter ausgedruckt wurden Messungen zur Dokumentation. Teilweise sind auch diese Bilder später weiter untersucht worden.

Als Zubehör dienten verschiedene Messkabel, selbst hergestellte Anschlussboxen und Tastköpfe. Speziell bei der Abtastung der digitalen Signale wurden fallweise auch externe Netzgeräte zur Spannungsversorgung benutzt.

5.5 ÜBERWACHUNG DER DREHSCHIEBERSTELLUNG

In diesem Abschnitt soll die Stellung des Drehschiebers genauer untersucht werden. Dazu sind am Drehschieber einige Abtastpunkte festgelegt worden, die durch Näherungsschalter abgefragt werden. Im Hinblick auf ihre geplante Verwendung werden diese Punkte mit „3 Start“, „1 Ende“ und „2 Verdichten“ bezeichnet. Grundlage für die theoretische Analyse ist die weiter oben erwähnte weitere Zeichnung der *Fa. Uherek*, die in der Abbildung 5.10 gezeigt ist.

Das obere Teilbild aus der Abb. 5.10 zeigt die Befestigungspositionen der Initiatoren. Zwei Sektorscheiben, eine vor der Keilriemenscheibe und eine hinter der Keilriemenscheibe sind im unteren Teilbild dargestellt. Auf der hinteren Scheibe befinden sich die Betätigungselemente für diese Initiatoren. Aus Abb. 5.10 ist nicht ersichtlich, dass für die Betätigung der Initiatoren kleine Metallzylinder vorgesehen sind, die mit einer versenkten Schraube auf der Sektorscheibe in unterschiedlichen Spuren befestigt wurden. Beim Vorbeidrehen wird, entsprechend dem Durchmesser, jeweils der zugehörige Metallzylinder seinen Initiator betätigen. Im ersten Schritt werden die Positionen dieser Betätigung in Relation zu den

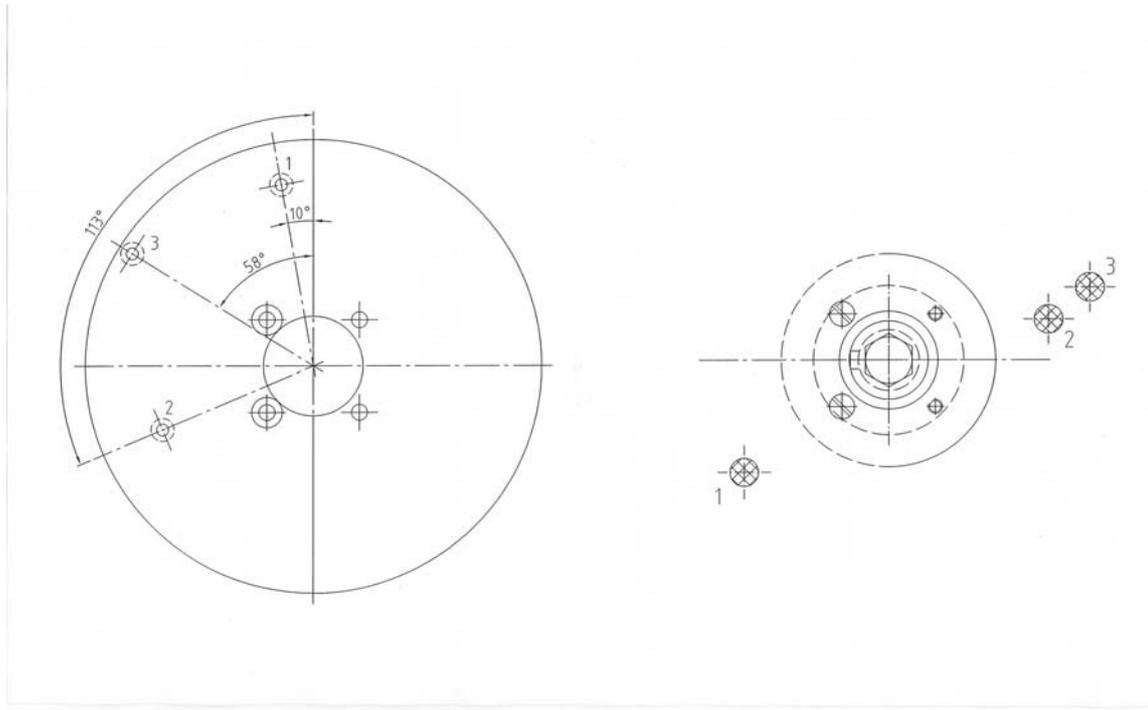
weiter oben untersuchten Ausfräsungen gestellt. Als Bezugspunkt wird, wie oben, die Passfeder gewählt.

Aus der Zeichnung ist zu entnehmen, dass in der angegebenen Drehrichtung zuerst der mit „2 Verdichten“ bezeichnete Metallzylinder ihren Initiator erreicht, danach derjenige, der mit „1 Ende“ bezeichnet worden ist und nach nahezu einer vollen Umdrehung schließlich auch der letzte Schaltpunkt mit der Bezeichnung „3 Start“ erreicht wird.

Als Nullpunkt wird nun der in der unteren Teilskizze angenommene Punkt für 0° verwendet, die Zählrichtung gegen den Uhrzeigersinn. In Tabelle 5.7 sind die aus den Skizzen entnommenen Punkte zusammengefasst, wobei alle Werte jeweils auf den Nullpunkt bezogen sind.

Position des Betätigungspunktes: Winkel	Sensorposition: Winkel	Der Sensor wird betätigt nach einer Drehung des Drehschiebers um
Sensor 1 (Ende): $270^\circ - 10^\circ = 260^\circ$	Sensor 1 (Ende): $128^\circ - 90^\circ = 38^\circ$	$10^\circ + 90^\circ + 38^\circ = 138^\circ$
Sensor 3 (Start): $270^\circ - 58^\circ = 212^\circ$	Sensor 3 (Start): $270^\circ - 70^\circ = 200^\circ$	$58^\circ + 90^\circ + 200^\circ = 248^\circ$

Tab. 5.7: Schaltwinkel der Initiatoren



Legende: Initiator 1 „Ende“, Initiator 2 „Verdichten“, Initiator 3 „Start“

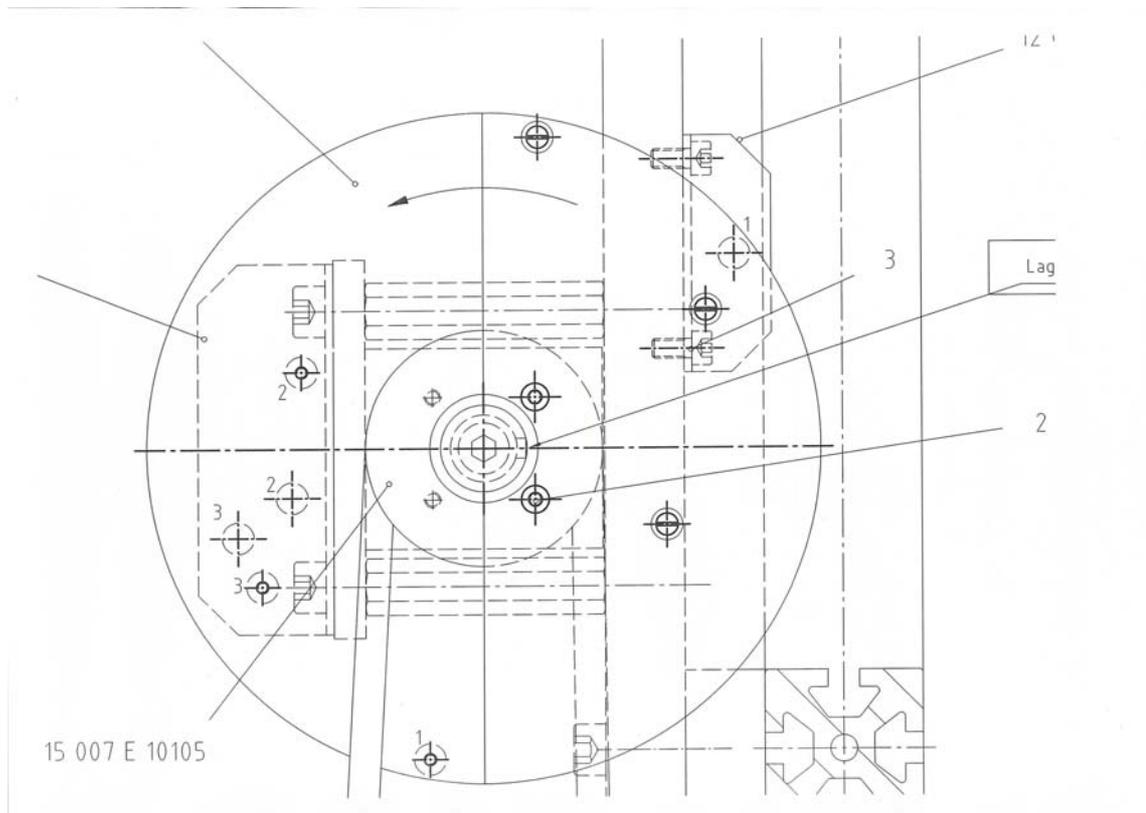


Abb. 5.10: Lage der Abfragepunkte am Drehschieber

In der obigen Abbildung 5.9 wurde die durch den Drehschieber sich wiederholende Bewegung des Zylinders aufgezeichnet. Die nachfolgenden Werte sind aus dieser Abbildung entnommen, beginnend mit dem Anstieg der ersten Bewegung, endend mit dem Anstieg der darauf folgenden Bewegung. Gemessen wurden bei starker Vergrößerung der Abbildung die Abstände der Gitterlinien jeweils von Links beginnend und die entsprechenden Punkte der Bewegung bzw. Schaltpunkte der Sensoren¹². Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Messpunkte	Abstand [mm]	Anmerkung
Zeitraster	91	entspricht 50 ms
von Sensor 3 (Start) bis Sensor 3 (Start): Unterste Spur (rot)	155	entspricht 360° (85 ms) (Frequenz 11,75 Hz)
Von Sensor 3 (Start) bis Sensor 1 (Ende): 2. Spur von unten (violett)	66	entspricht 153° (36 ms)

Tab. 5.8: Schaltwinkel und Zeitdifferenzen (Messung an einer Maschine)

In der Folge sollen die gemessenen Werte (Tab. 5.8) in Relation zu jenen Werten gebracht werden, die wir vorher als Schaltwinkel der Initiatoren ermittelt hatten (Tab. 5.7). Mit Hilfe der gewonnenen Werte lassen sich die Schaltpunkte der normieren. Der Schaltabstand von Sensor 3 zu Sensor 1 entspricht einem Drehwinkel des Drehschiebers von (Berechnung in Drehrichtung)

$$360^\circ - 248^\circ + 38^\circ = 150^\circ \text{ (theoretischer Wert)}$$

der Schaltabstand mit den Werten aus Tabelle 3 ergab

$$153^\circ \text{ (abgelesener Wert)}$$

also eine ausreichend gute Übereinstimmung¹³. Die Ergebnisse der Normierung sind in Tabelle 5.9 zusammengestellt.

¹² Diese Messung ist natürlich nicht genau (Fehlerquellen: Vergrößerung, Ablesefehler durch Parallaxe). Für die weiteren Betrachtungen ist die Genauigkeit jedoch ausreichend.

¹³ Fehler: 2 %

Messpunkt	Normierte Werte (Normierungspunkt: Sensor 3)	Anmerkung
Start der Bewegung	$248^\circ - 81^\circ = 167^\circ$	Nullpunktverschiebung, Differenz der aus der Skizze und der Messung entnommenen Werte
Ende der Bewegung	$239^\circ + 167^\circ = 406^\circ$ (46°)	
Start der folgenden Bewegung	$360^\circ + 167^\circ = 527^\circ$ (167°)	
Sensor 3 (Start) unterste Spur (rot)	$81^\circ + 167^\circ = 248^\circ$	
Sensor 1 (Ende) 2. Spur von unten (violett)	$236^\circ + 167^\circ = 403^\circ$ (43°)	

Tab. 5.9: Normierte Messpunkte Zylinderbewegung und Schaltpunkte von Sensoren

In Abbildung 5.11 sind die Abfragezeitpunkte für die Sensoren skizziert, wie sie angeordnet sein sollten. Bezogen auf die hier dargestellte Anordnung gilt, dass der hier verwendete Sensor „Ende“ nahezu den idealen Abfragezeitpunkt für den Startzeitpunkt darstellt (also bei dieser Anordnung etwa um 155° in Drehrichtung verschoben werden sollte), und dass die Abfrage für das Ende um etwa 105° in Drehrichtung verschoben werden muss. Der bisher noch nicht betrachtete Schaltzeitpunkt für das Verdichten muss jedenfalls innerhalb der Kurve für die Hubbewegung liegen.

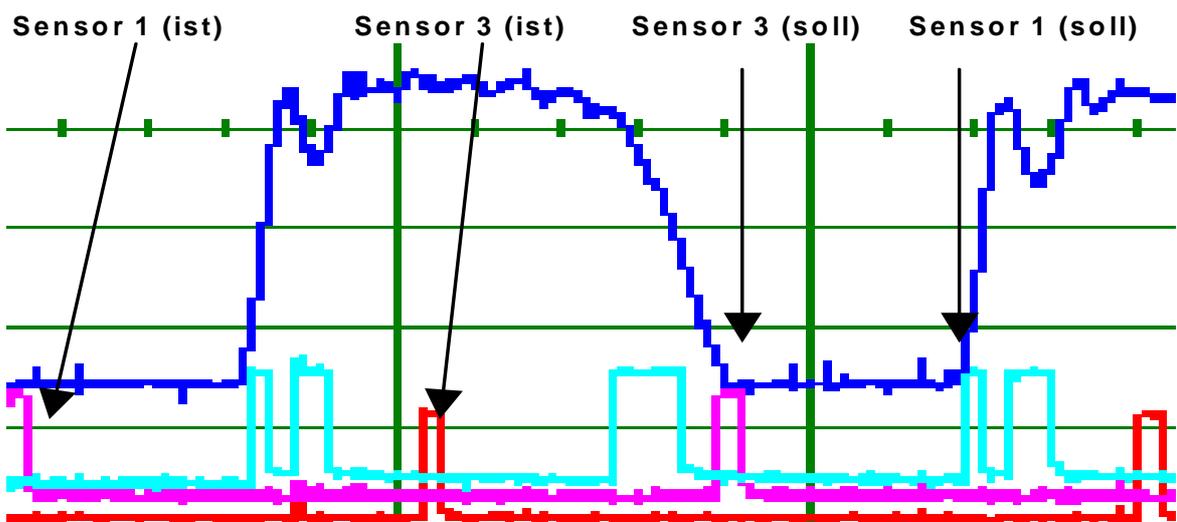


Abb. 5.11: Lage der Abfragepunkte am Drehschieber

Ergänzend zur hier festgestellten Forderung nach der Verschiebung der Sensoren sei an die Funktion erinnert: zu einem möglichst späten Zeitpunkt, jedenfalls aber noch in der Ruhelage des Stampfkopfes, sollen die Druckluftimpulse vom Drehschieber zur Bewegung des Stampfzylinders freigegeben werden. Dabei soll sichergestellt sein, dass nach der Freigabe ein vollständiger Hub ermöglicht wird. Mit dieser Funktion wird eigentlich nur der erste Schlag kontrolliert. Nach einer ausreichend großen Anzahl von Schlägen wird das zu erreichende Niveau der Füllung erreicht. Zu diesem Zeitpunkt befindet sich der Stampfzylinder in seiner unteren Ruhelage. Werden der Schaltzeitpunkt für das Ende der Stampfvorganges und die Abfrage für das Niveau zeitgleich abgefragt, ist der Stampfvorgang beendet und kann abgebrochen werden. Dabei unterbricht das Ansteuerventil die Luftzufuhr für den Drehschieber.

5.6 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Die nachfolgenden Messungen wurden an der Maschine BSL4 bei der *Fa. Schunk Wien* durchgeführt. Zuerst wurden Bewegungsabläufe mit unterschiedlichen Schlagfrequenzen aufgezeichnet, wobei die Grundeinstellungen der gerade laufenden Produktion unverändert übernommen worden sind. Für die folgenden Aufzeichnungen gilt: Stampfdruck 2,25 bar, Federn: 2 Stk. mit je 1,75 N/mm (Federsatz D).

Für die weiteren Messungen wurde der Stampfdruck beibehalten, Federsatz und Schlagfrequenz variiert. In der letzten Messreihe wurde der dritte Initiator am Drehschieber anstelle des Niveauschalters in die Aufzeichnung mit einbezogen und die Bewegungen ohne Kohlebürste aufgezeichnet.

Ziel der folgenden Messreihen ist, Erkenntnisse über den Bewegungsablauf beim Stampfvorgang, insbesondere über seine Einflussgrößen, zu gewinnen.

5.6.1 1. MESSREIHE

Variiert wurde für die erste Messreihe nur die Schlagfrequenz. Für die folgenden Abbildungen gilt, dass die mit *Trace 1* bezeichnete Spur den Hub des Stampfzylinders darstellt, die mit *Trace 2* bezeichnete Spur das Startsignal, die mit *Trace 3* bezeichnete Spur die Stampfhöhe (im betrachteten Fall 3,5 mm Bohrlochtiefe bei einer Gesamthubhöhe von 8 mm) und die mit *Trace 4* bezeichnete Spur das Stoppsignal.

Die Schlagfrequenz wurde durch die unterschiedliche Drehzahl des Drehschiebers realisiert, die entsprechende Einstellung des Sollwertes ist bei den Bildern angegeben (Abb. 5.12 bis 5.15).

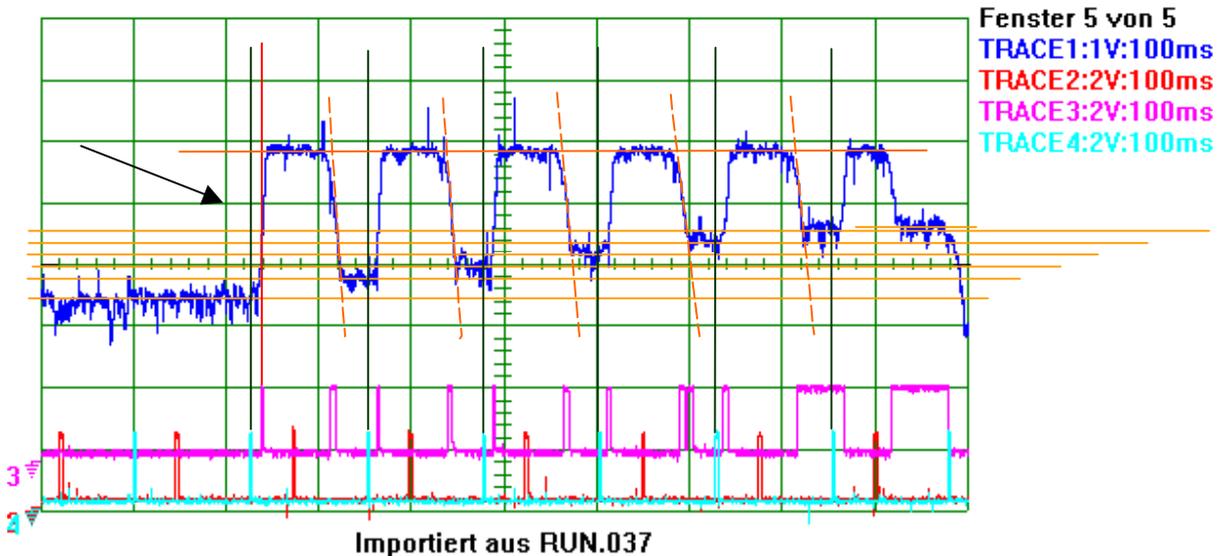


Abb. 5.12: Messung (Potentiometereinstellung 4,5)

Theoretisch sollte die Aufzeichnung der Bewegungslinie des Stampfzylinders (*Trace 1* in Abb. 5.12) eine glatte Linie ergeben. Die Signalschwankungen kommen zu einem Teil von der Spannungsversorgung. Es sind an dieser Maschine unter anderem insgesamt vier Frequenzumrichter und einige getaktete Netzteile im Einsatz. Dazu kommen noch die Schwingungen und Vibrationen an der Maschine, die von den weiteren Bearbeitungsstationen verursacht werden und durch das optische Messsystem mit aufgezeichnet werden. Die Linie *Trace 2* repräsentiert den Initiator für Start, *Trace 4* jenen für Stop. Eine Umdrehung des Drehschiebers ist durch die Abstände auf der Zeitachse ablesbar, wobei eine Rasterteilung in der Abb. 5.10 eine Zeitspanne von 100 ms darstellt. Zur Ermittlung der Zeit werden die zugehörigen Abstände bei starker Vergrößerung des Bildes abgemessen und in Relation zur Rasterteilung gesetzt. Auf diese Art wurde eine Zeitdauer für eine Umdrehung mit 124,8 ms oder die Frequenz von 8 Hz ermittelt. Die eingezeichneten Hilfslinien stellen die Füllhöhe des Pulvers dar. Beim ersten Schlag kommt noch die durch den Knoten gebildete Höhe dazu, bei den weiteren Schlägen liegt die Höhendifferenzen bedingt durch die gleiche¹⁴ Öffnungszeit des Pulverzuflusses in einer ähnlichen Größenordnung. Die Linie *Trace 3* repräsentiert den Initiator für die Niveauabfrage. Es ist deutlich zu

¹⁴ Schwankungen der Füllhöhe bedingt durch unterschiedliches Fließverhalten des Pulvers lassen sich nicht beeinflussen, sind jedoch unerwünscht.

erkennen, dass der Initiator für das Stampfniveau jeweils beim Schnitt der Bewegungslinie mit der Höhe anspricht. Weiteres kann mit der oben beschriebenen Methode die Zeitdauer des Ansprechens der Initiatoren am Drehschieber mit 3 – 4 ms festgestellt werden. Die am weitesten rechts eingetragene Hilfslinie zeigt, dass der Initiator für Stop bei der untersuchten Maschine etwa jene Position angibt, bei der die Bewegung beginnt. Rechnet man jene Abstände von der Hilfslinie (Stop-Initiator) bis zur Linie der aufsteigenden Bewegung in Zeitabstände in der Höhe jener mit dem Pfeil bezeichneten Linie um, ergibt sich ein Zeitbereich von etwa 14 bis 11 ms, im Schnitt 12,5 ms. Die Messung bezeichnet eine bestimmte Hubhöhe des Stampfzylinders. Auf Grund des im Vergleich zu den anderen Messungen festgestellten Kurvenverlaufes, darf angenommen werden, dass die weiter oben beschriebenen Störeinflüsse an dieser Stelle die Ergebnisse nicht verfälschen, abgesehen von den noch nicht diskutierten Ablesefehlern. Der oben ermittelte Durchschnittswert wird bei den folgenden Messungen für die unterschiedlichen Frequenzen ermittelt.

Untenstehende Abbildungen zeigen Messergebnisse mit jeweils zunehmenden Schlagfrequenzen, mit sonst gleichen Einstellungen.

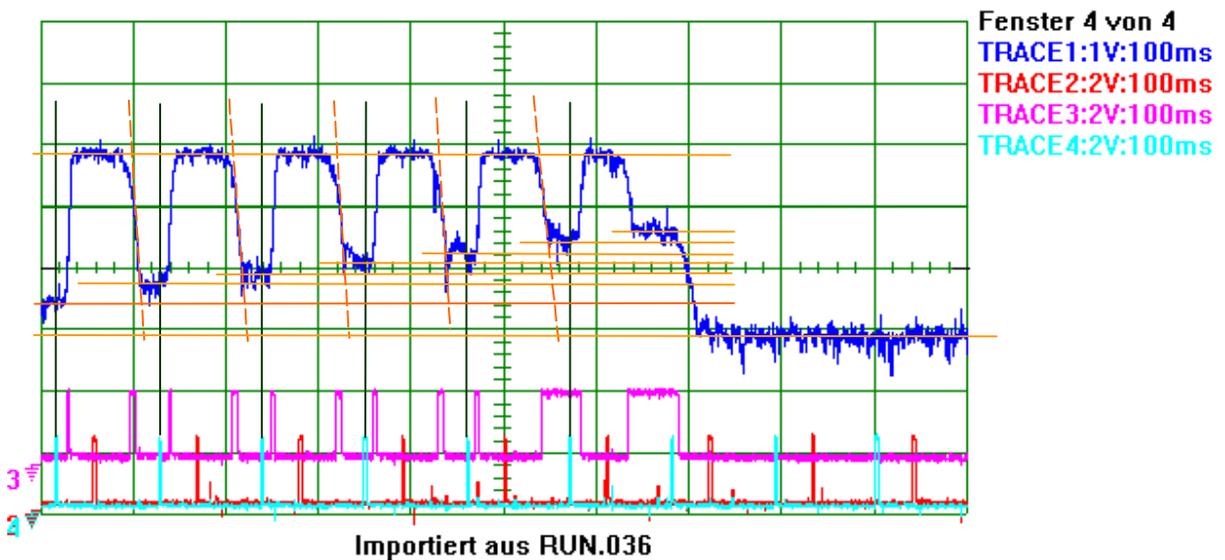


Abb. 5.13: Messung (Potentiometereinstellung 5)

In Abb. 5.13 ist das Stampfen bei einer Taktdauer von 109,2 ms oder einer Frequenz von 9,1 Hz dargestellt. Bezüglich der Zeitabstände ergibt sich auch hier ein Zeitbereich von etwa 14 bis 11 ms, im Schnitt 12,5 ms.

Abbildung 5.14 entspricht der Standardeinstellung für eine produzierte Kohlebürste. Für die Taktdauer wird hier 97 ms abgelesen, die Frequenz beträgt daher

10,3 Hz. Auch bei diesem Bild können die vorher ermittelten Zeitabstände, also 12,5 ms, festgestellt werden. Abgesehen von einer höheren Frequenz ist das gleiche Zeitverhalten auch aus der Abb. 5.13 abzulesen. Eine weitere Steigerung der Frequenz zeigte ein ähnliches Ergebnis.

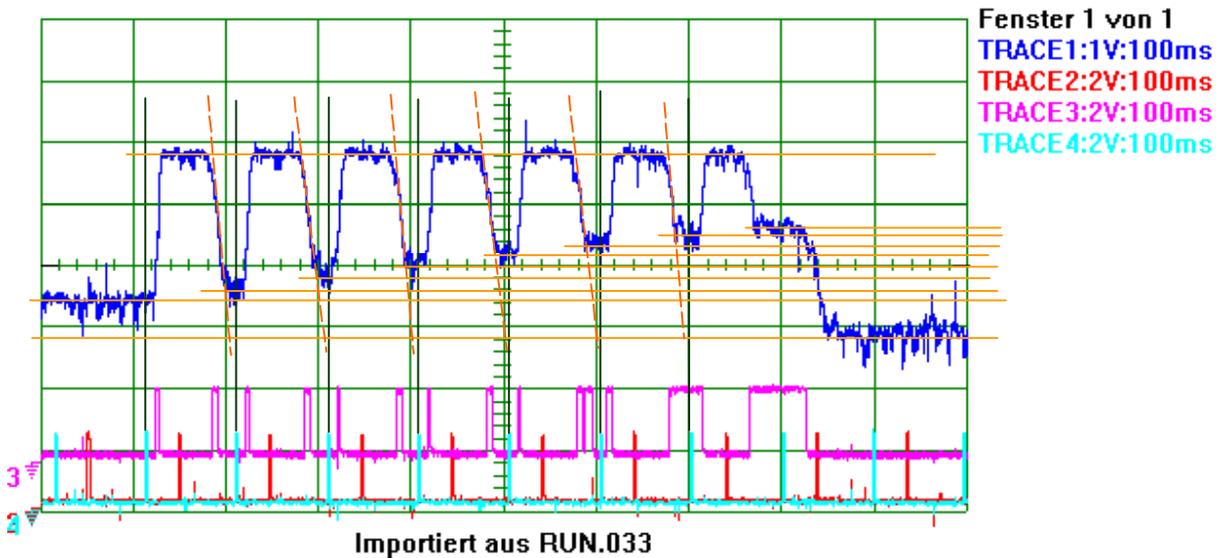


Abb. 5.14: Messung (Potentiometereinstellung 5,8)

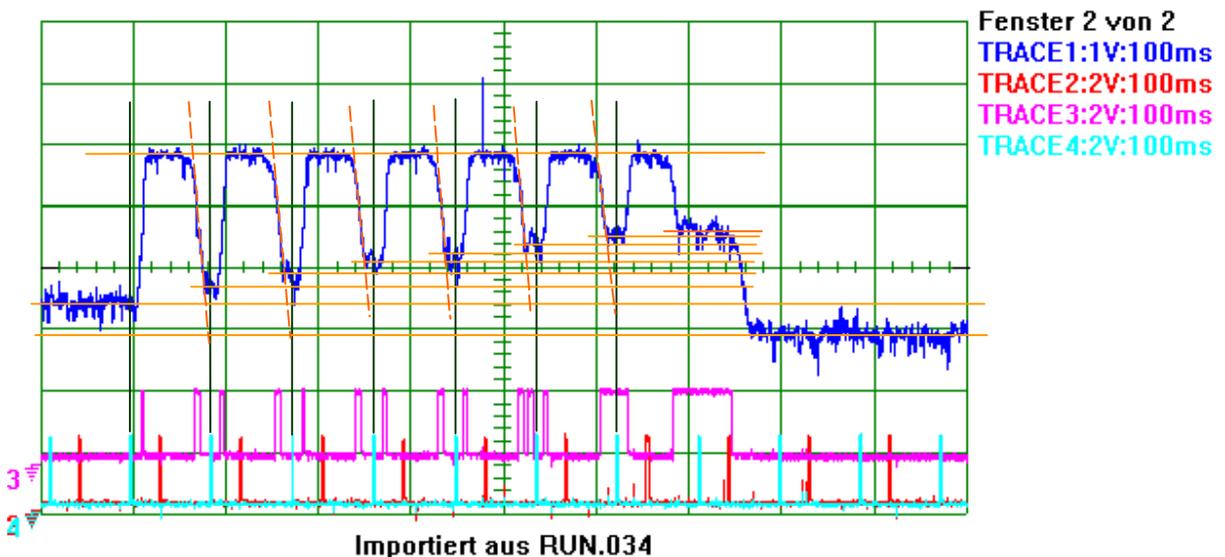


Abb. 5.15: Messung (Potentiometereinstellung 6,5)

Ähnlich den vorher durchgeführten Auswertungen werden die Zeitabstände für die Abwärtsbewegung ermittelt, bezogen auf den eingezeichnete Bezugslinie, die sich auf den Zeitpunkt des Initiators für Stop bezieht. Als Bezugshöhe wurde die jene Linie gewählt, die durch den Pfeil in Abb. 5.12 gekennzeichnet ist. Laut Messung liegen diese Abstände in Abb. 5.12 im Bereich von 87,3 ms bis 91,5 ms, im Mittel also bei 89,4 ms, in Abb. 5.13 im Bereich von 85,9 ms bis 84,5 ms, im Mittel also

bei 83,0 ms, in Abb. 5.14 im Bereich von 76,0 ms bis 77,4 ms, im Mittel also bei 76,7 ms und in Abb. 5.15 im Bereich von 70,4 ms bis 73,2 ms, im Mittel also bei 71,8 ms.

Mit den weiteren Angaben wird nun die Höhe der Stampfung bestimmt. Ausgehend von der Messung Abb. 5.12 folgt bei dem gegebenen Gesamthub von 8 mm eine Höhendifferenz bis zur Füllung des Bohrloches von 4,12 mm und als Abstand zur „Füll-Linie“ 5,1 mm, ebenfalls vom Boden des Bohrloches gemessen, als jene Höhe, oberhalb derer der Pulverfluss erfolgen kann. Zur Füllung des Bohrloches ist anzumerken, dass bei dem für diese Messungen herangezogenen Fertigungsverfahren eine Bohrlochtiefe von 3,5 mm angegeben war, der von uns ermittelte Wert also nicht besonders gut mit den Vorgaben übereinstimmt. Anzumerken dazu ist allerdings, dass diese Stampfung versuchsweise mit einer zu kleinen Schlagfrequenz durchgeführt worden ist, als jener, die für diese Einstellungen sonst üblich ist.

In Tabelle 5.10 sind die aus Abb. 5.12 gewonnenen Werte zusammengestellt. Als Nullpunkt für die Höhenmessung ist der Boden des Bohrloches angenommen worden. Hinzugenommen wurde noch die Steigung der Tangente aus der Aufzeichnung des Bewegungsablaufes (Geschwindigkeit), die zur Bestimmung der Schlagenergie benötigt wird. Sie wurde ebenfalls aus einer starken Vergrößerung der Abbildung ermittelt. Der letzte Schlag wurde nicht berücksichtigt. Dieser ist als „Verdichtungsschlag“ konzipiert, wird aber auf Grund der derzeitigen Anordnung der Initiatoren am Drehschieber nicht wie ursprünglich konzipiert¹⁵ durchgeführt. Dennoch ist erkennbar, dass dieser Schlag eine deutlich kürzere Öffnungszeit (Verweildauer oben) aufweist. Wir werden diesen Punkt später nochmals aufgreifen.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	6,92	873,9
2. Schlag	6,22	777,2
3. Schlag	5,52	635,6
4. Schlag	5,23	499,4
5. Schlag	4,92	582,2
Verdichten	4,12	-

Tab. 5.10: Messergebnisse aus Abb. 5.12

¹⁵ Bei einem Verdichtungsschlag soll die oberste Lage der Pulverfüllung nochmals zusammengedrückt werden, also kein (oder möglichst wenig) Pulver nachfließen können.

Die Auswertung der folgenden Aufzeichnung (Abb. 5.13) ergab die in Tabelle 5.11 unter sonst gleichen Voraussetzungen zusammengefassten Werte.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	7,01	829,6
2. Schlag	6,36	770,9
3. Schlag	5,80	749,6
4. Schlag	5,38	546,2
5. Schlag	4,68	553,8
Verdichten	4,19	-

Tab. 5.11: Messergebnisse aus Abb. 5.13

Die Auswertung der nächsten Aufzeichnung (Abb. 5.14) ergab die in Tabelle 5.12 unter sonst gleichen Voraussetzungen zusammengefassten Werte. Hier werden bereits 6 Schläge zum Füllen des Bohrloches benötigt.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	7,30	646,0
2. Schlag	6,66	429,7
3. Schlag	6,04	534,5
4. Schlag	5,40	403,0
5. Schlag	4,91	412,6
6. Schlag	4,35	621,4
Verdichten	4,00	-

Tab. 5.12: Messergebnisse aus Abb. 5.14

Die Auswertung der letzten hier dargestellten Aufzeichnung (Abb. 5.15) ergab die in Tabelle 5.13 zusammengefassten Werte.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	7,22	644,6
2. Schlag	6,45	608,5
3. Schlag	5,82	485,0
4. Schlag	5,54	655,6
5. Schlag	4,98	589,3
6. Schlag	4,46	452,3
Verdichten	4,21	-

Tab. 5.13: Messergebnisse aus Abb. 5.15

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des Stampfvorganges bei allen Versuchen zumindest bei Sichtkontrolle der Stampfkontakte zufriedenstellend ausgefallen sind. Die Bohrlöcher waren alle in der gleichen Art gefüllt. Es wurden zu jeder Einstellung einige Kohlebürsten angefertigt, wobei sich die Ergebnisse wiederholen ließen. Zunächst noch nicht überprüft wurden die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Versuchskohlen.

5.6.2 ERSTE ABSCHÄTZUNG DES MESSFEHLERS

Bevor weitere Messergebnisse betrachtet werden, soll auf Grund der starken Streuung der einzelnen Ergebnisse eine kurze Fehlerbetrachtung angestellt werden.

Der erste Eindruck der Messreihen in den Abbildungen 5.12 bis 5.15 zeigt nahezu die gleiche Neigung der in die Bilder eingefügten Tangenten. Rechnet man die Werte für die Steigung dieser Tangenten auf die Geschwindigkeit um, sieht man große Unterschiede der zugehörigen Werte. Die folgende Abbildung ist ein Teilausschnitt der Abbildung 5.13.

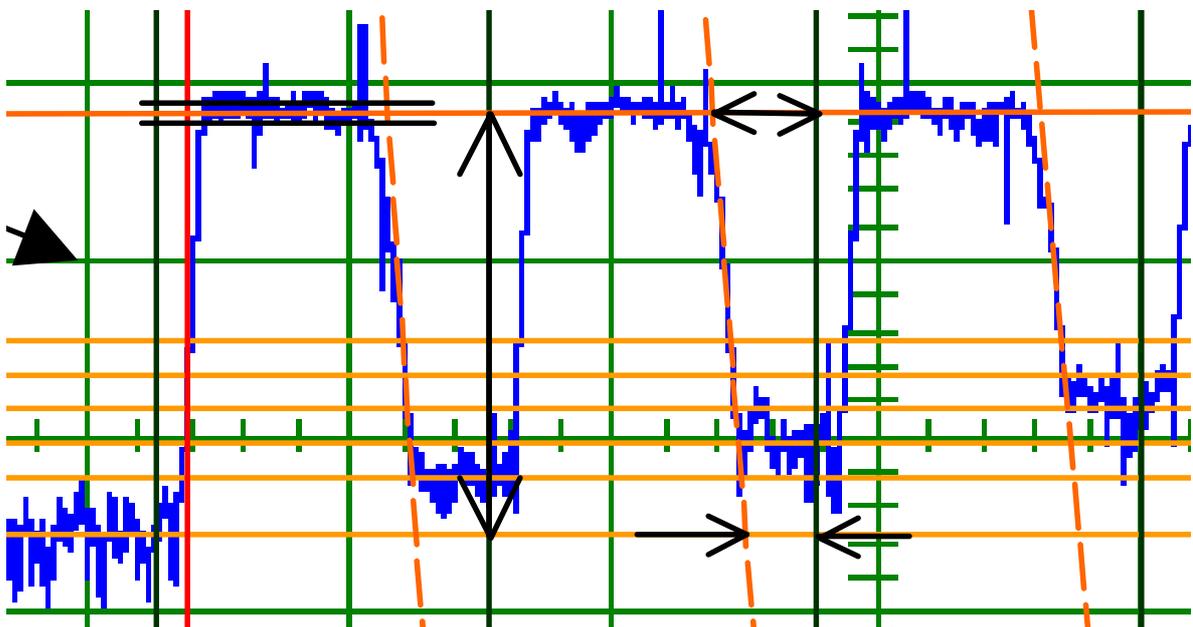


Abb. 5.16: Maßpfeile für Messung von Abständen

Zunächst wurden in die zu untersuchenden Aufzeichnungen Hilfslinien eingetragen, die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt worden sind. Bei einer etwa doppelt so großen Vergrößerung des gezeigten Bildes wurden auf

Abstände abgenommen. Diese Abstände sind in Relation zu den maschinen-spezifischen Angaben gesetzt und umgerechnet worden, wie z.B. für die Gesamthöhe die an der Maschine nachgemessenen 8 mm für den Hub (das eingezeichnete vertikale Maß) oder die Rasterteilung 100 ms (Grundeinstellung der Zeitbasis des Messgerätes) für die Zeitbestimmung. Der Anstieg der Tangenten und damit die erreichte Geschwindigkeit kann aus Zeitdifferenzen (horizontale Maße) und Höhendifferenzen (zurückgelegter Weg) errechnet werden. Unterstellt wurde das weitgehend lineare Verhalten der Höhenmessung. Die Höhenmessung selbst wurde für den Anfangs und Endpunkt und einen zusätzlichen Punkt zu einem früheren Zeitpunkt überprüft, wobei die Genauigkeit der Bildschirmanzeige mit Hilfe eines Voltmeters festgestellt worden ist (geschätzter Messfehler besser als 2%).

Auf Grund der Aufzeichnung ist aber klar, dass die Vibrationen an der Maschine, die neben elektrischen Störeinflüssen wirksam waren, zu Fehlern bei der Ermittlung der Höhen und der Tangenten geführt haben können. Die in der Abbildung eingezeichnete mögliche Höhendifferenz würde nach der verwendeten Messmethode einen Fehler von 0,035 mm, bezogen auf die Hubhöhe von 8 mm, darstellen. Insgesamt muss also mit einem Messfehler in der Größenordnung von 5% gerechnet werden.

5.6.3 2. MESSREIHE

Es wurde bereits vorher erwähnt, dass die Anzahl der Parameter, die für die Qualität eines Stampfkontaktes bestimmend sind, sehr groß ist. Bei der Untersuchung dieser Einflussgrößen werden Grundeinstellungen von Vorversuchen beibehalten und bestimmte Parameter variiert. Ziel der weiteren Messreihen ist, Erkenntnisse über den Einfluss der Federn auf das Zeitverhalten¹⁶ des Stampfkopfes zu gewinnen.

Variiert wurde für die zweite Messreihe ebenfalls nur die Schlagfrequenz. Zum Federsatz D wurde jedoch noch der Federsatz C zur Verstärkung der Zugkraft hinzugefügt und damit die Zugkraft auf insgesamt 5,66 N/mm erhöht. Die Aufzeichnungen sind in den nachstehenden Abbildungen dargestellt (Abb. 5.17 bis 5.19).

¹⁶ Neben der Suche nach Erkenntnissen von Einflüssen zur Verbesserung der Qualität der erzeugten Kohlebürsten, wird auch die Reduktion von durch das System bedingten Verzögerungen betrachtet, um Potenziale zur Leistungssteigerung auszuschöpfen.

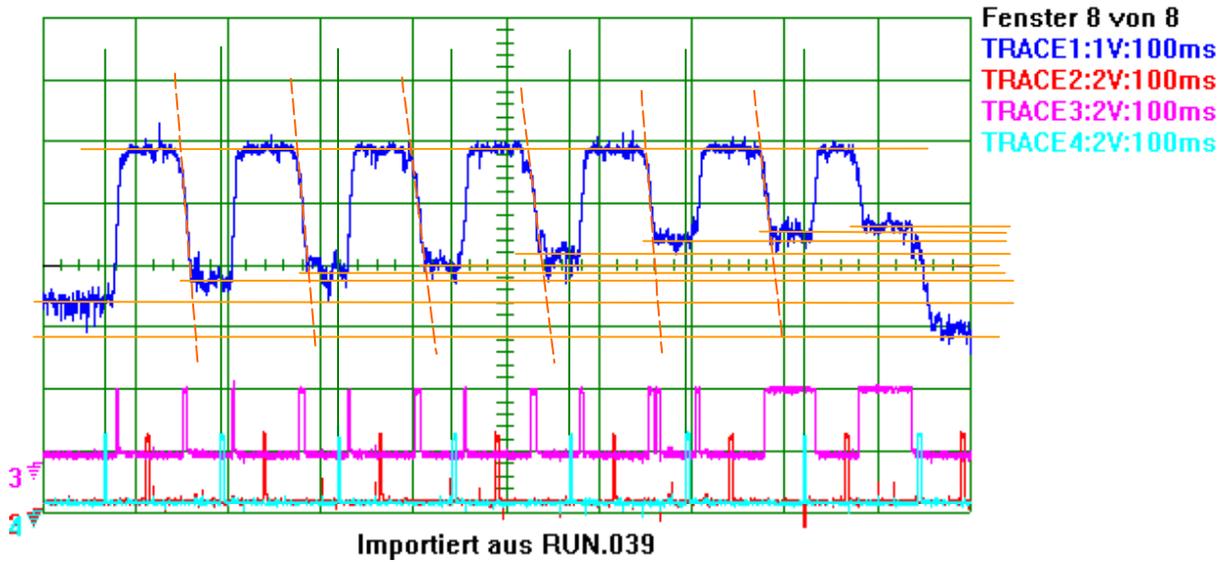


Abb. 5.17: Messung (Potentiometereinstellung 4,5)

In Abb. 5.17 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 128 ms oder einer Frequenz von 7,8 Hz dargestellt.

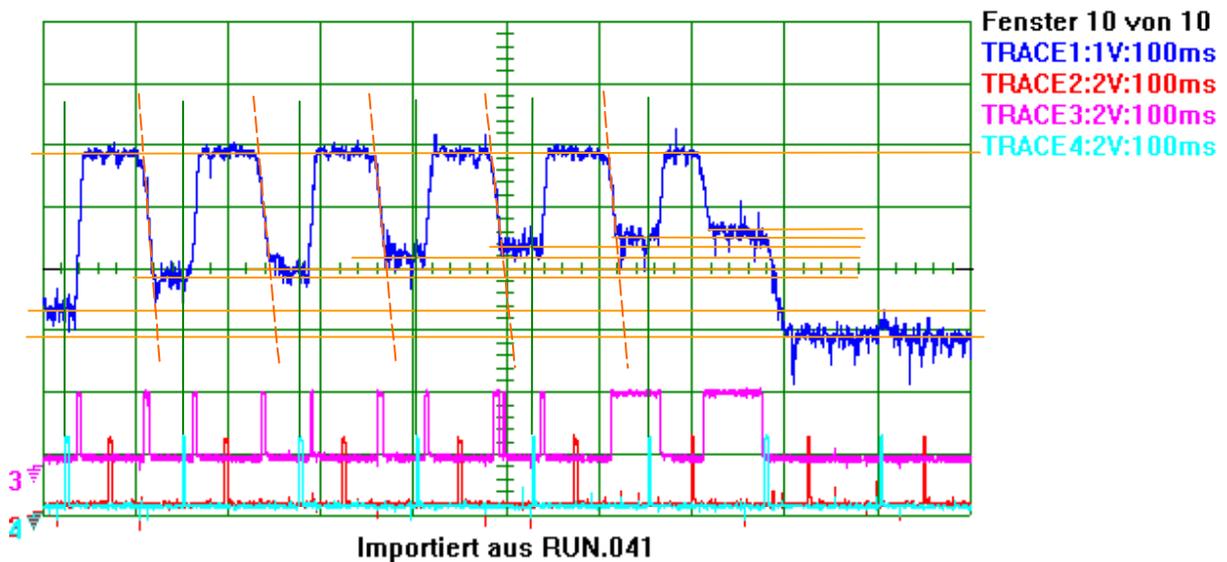


Abb. 5.18: Messung (Potentiometereinstellung 6)

In Abb. 5.18 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 125,3 ms oder einer Frequenz von 8,0 Hz dargestellt.

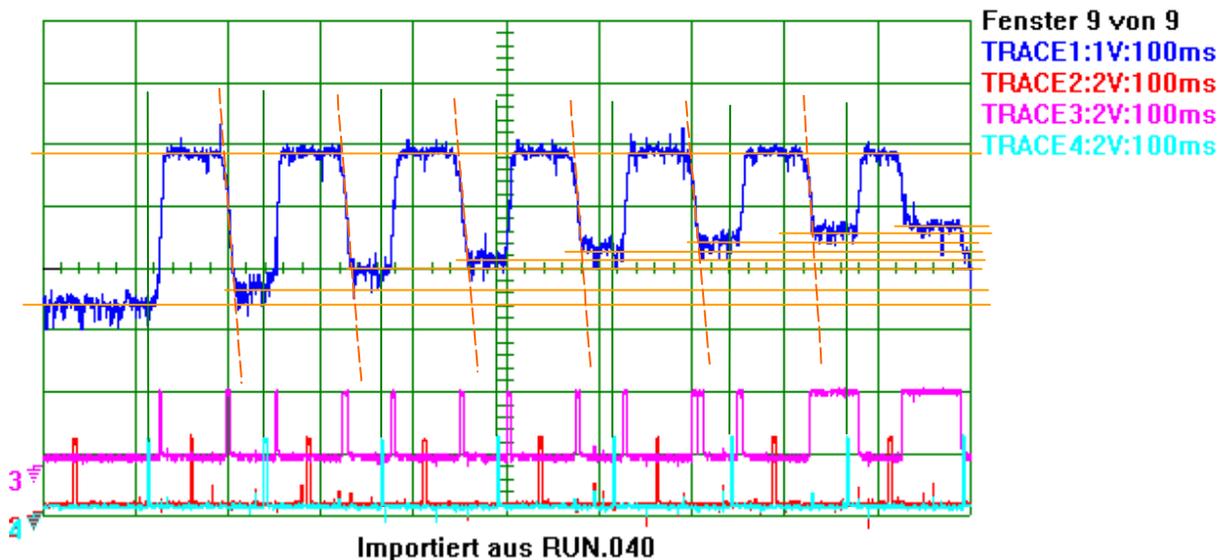


Abb. 5.19: Messung (Potentiometereinstellung 7)

In Abb. 5.19 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 122,5 ms oder einer Frequenz von 8,2 Hz dargestellt.

Ähnlich den vorher durchgeführten Auswertungen werden die Zeitabstände für die Abwärtsbewegung ermittelt, bezogen auf den eingezeichnete Bezugslinie, die sich auf den Zeitpunkt des Initiators für Stop bezieht. Laut Messung liegen diese Abstände in Abb. 5.17 im Bereich von 84,5 ms bis 87,3 ms, im Mittel also bei 85,9 ms, in Abb. 5.18 im Bereich von 85,9 ms bis 87,3 ms, im Mittel also bei 86,6 ms und in Abb. 5.19 im Bereich von 84,5 ms bis 87,3 ms, im Mittel also bei 85,2 ms.

In Tabelle 5.14 sind die aus der Abb. 5.16 gewonnenen Werte zusammengestellt. Die Ermittlung der Werte und die Berechnungen erfolgten wie vorher beschrieben.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
1. Schlag	7,02	553,8
2. Schlag	6,67	526,2
3. Schlag	6,32	498,6
4. Schlag	5,68	403,3
5. Schlag	4,98	589,3
6. Schlag	4,56	404,7
Verdichten	4,21	-

Tab. 5.14: Messergebnisse aus Abb. 5.17

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	6,67	829,6
2. Schlag	6,25	770,9
3. Schlag	5,61	749,6
4. Schlag	5,05	546,2
5. Schlag	4,49	553,8
Verdichten	3,79	-

Tab. 5.15: Messergebnisse aus Abb. 5.18

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1. Schlag	7,37	581,5
2. Schlag	6,25	591,7
3. Schlag	5,68	537,7
4. Schlag	5,26	622,4
5. Schlag	4,84	572,7
6. Schlag	4,21	664,2
Verdichten	3,92	-

Tab. 5.16: Messergebnisse aus Abb. 5.19

Zusammenfassend lässt sich auch bei dieser Messreihe feststellen, dass die Ergebnisse des Stampfvorganges auch bei dieser Versuchsreihe zumindest bei der Sichtkontrolle der Stampfkontakte zufriedenstellend ausgefallen sind, weil die Bohrlöcher gleich hoch und gleichartig gefüllt waren. Es wurden zu jeder Einstellung einige Kohlebürsten angefertigt, wobei sich auch hier die Ergebnisse bei weiteren Stampfungen wiederholen ließen. Aber auch in diesem Fall wurden weitere Eigenschaften der Versuchskohlen noch nicht überprüft.

Als grundlegender Unterschied zu den bisherigen Beobachtungen fällt bei Abb. 5.18 die besonders große Höhendifferenz beim ersten Schlag auf. Da die beobachtbaren Zeiten für die Öffnung nahezu gleich lange andauern, wäre die Möglichkeit zur Erklärung ein zu diesem Zeitpunkt besonders rieselfreudiges Pulver und damit eine entsprechend größere Menge.

5.6.4 3. MESSREIHE

Variiert wurde für die dritte Messreihe ebenfalls nur die Schlagfrequenz, das heißt Höhe und Stampfdruck sind nicht verändert worden. Anstelle des Federsatz D wurde jedoch nur der Federsatz C zur verwendet und damit die Zugkraft auf

insgesamt 2,16 N/mm vermindert. Die Aufzeichnungen sind in den nachstehenden Abbildungen dargestellt (Abb. 5.20 bis 5.22).

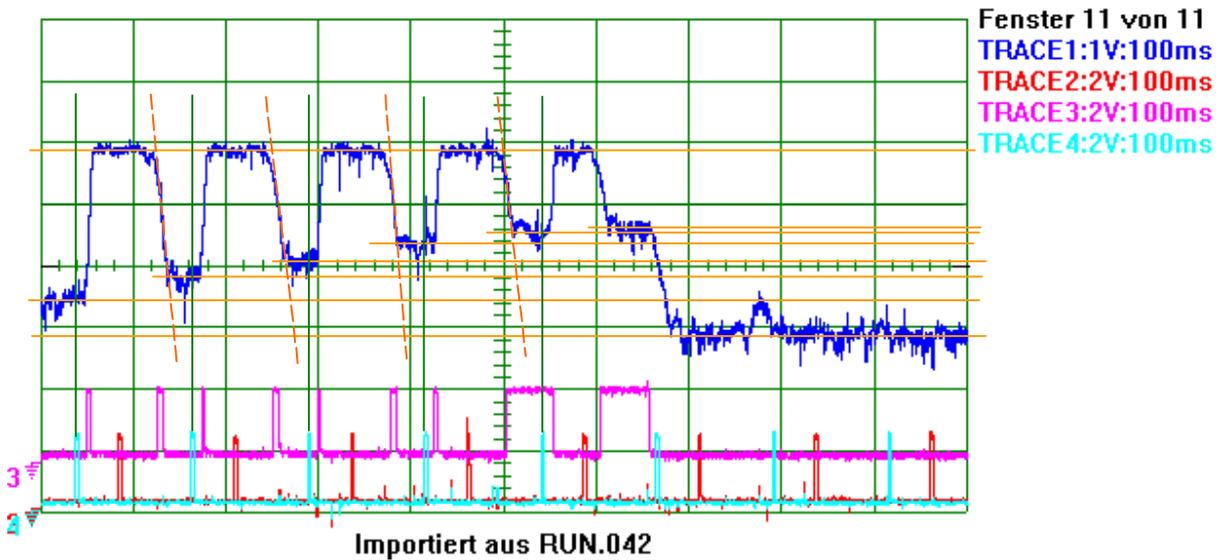


Abb. 5.20: Messung (Potentiometereinstellung 4,5)

In Abb. 5.20 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 125,3 ms oder einer Frequenz von 8,0 Hz dargestellt.

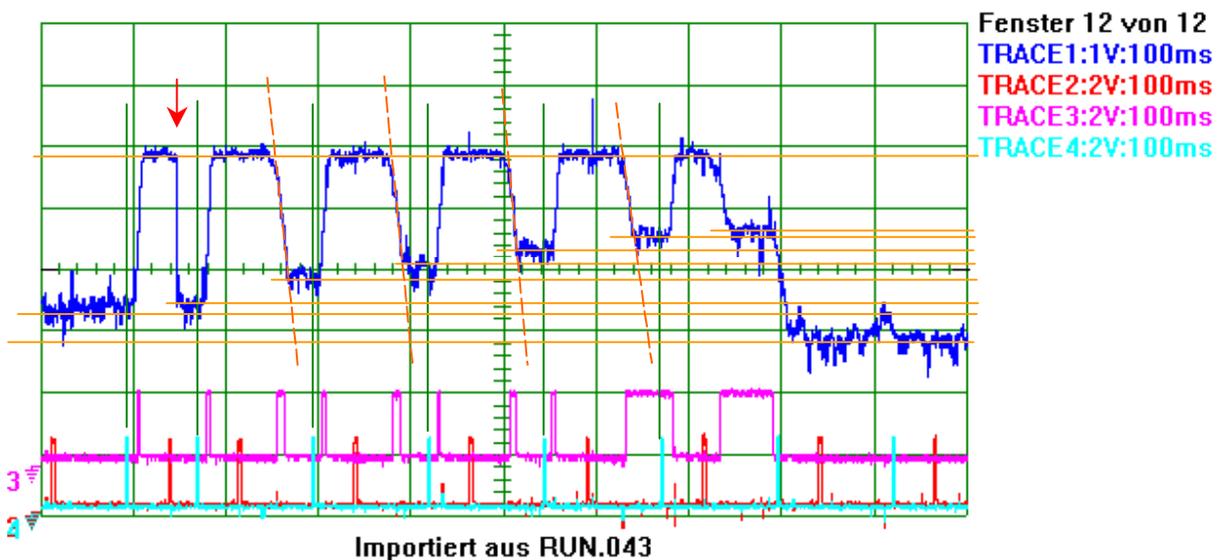


Abb. 5.21: Messung (Potentiometereinstellung 5)

Die laut Abb. 5.21 aufgezeichneten Messergebnisse zeigen nach dem ersten Schlag eine Verschiebung in der Aufzeichnung. Die Stampfhöhen können abgelesen werden, die Geschwindigkeit in dem betreffenden Punkt jedoch nicht.

In Abb. 5.21 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 122,5 ms oder einer Frequenz von 8,2 Hz dargestellt.

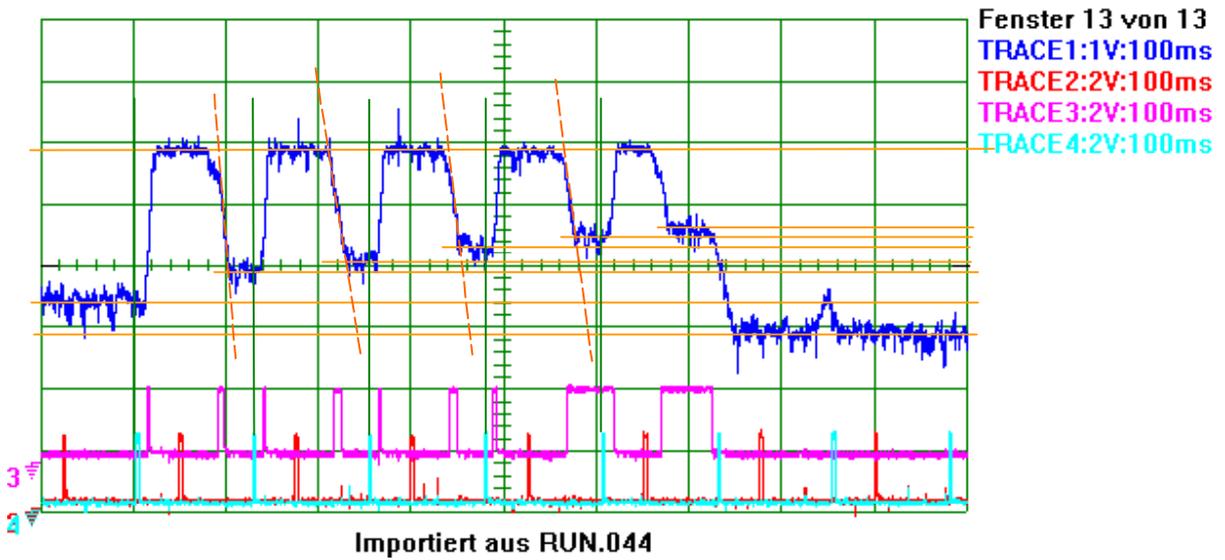


Abb. 5.22: Messung (Potentiometereinstellung 6)

In Abb. 5.22 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 122,5 ms oder einer Frequenz von 8,2 Hz dargestellt.

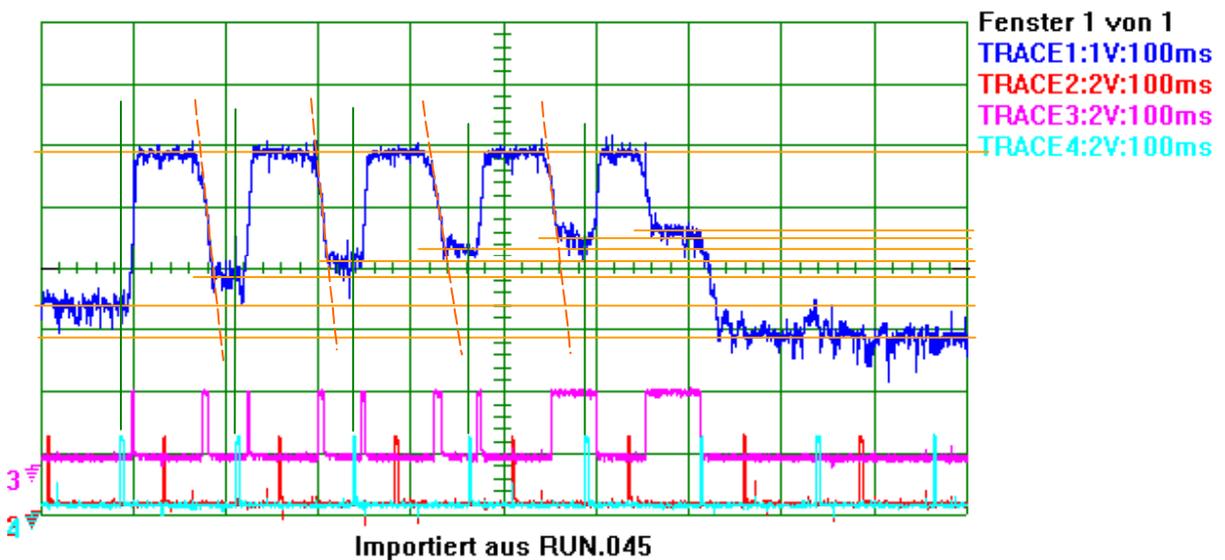


Abb. 5.23: Messung (Potentiometereinstellung 7)

In Abb. 5.23 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 109,2 ms oder einer Frequenz von 9,1 Hz dargestellt.

Auch hier wurden die Zeitabstände für die Abwärtsbewegung mit Hilfe der eingezeichneten Bezugslinie ermittelt. Laut Messung liegen diese Abstände in Abb. 5.20 im Bereich von 90,1 ms bis 91,5 ms, im Mittel also bei 90,8 ms, in Abb. 5.21 im Bereich von 88,7 ms bis 90,1 ms, im Mittel also bei 89,4 ms in Abb. 5.22 im Bereich von 91,5 ms bis 93,0 ms, im Mittel also bei 92,3 ms und in Abb. 5.23 im Bereich von 91,5 ms bis 93,0 ms, im Mittel also bei 92,3 ms.

In der folgenden Tabelle 5.17 sind die aus der Abb. 5.21 gewonnenen Werte zusammengestellt. Die Ermittlung der Werte und die Berechnungen erfolgten wie vorher beschrieben.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
1. Schlag	6,46	458,7
2. Schlag	5,96	403,0
3. Schlag	4,98	392,9
4. Schlag	4,35	441,2
Verdichten	4,14	-

Tab. 5.17: Messergebnisse aus Abb. 5.20

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
1. Schlag	7,16	-
2. Schlag	6,67	473,6
3. Schlag	5,75	510,3
4. Schlag	5,05	597,5
5. Schlag	4,35	386,0
Verdichten	3,92	-

Tab. 5.18: Messergebnisse aus Abb. 5.21

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
1. Schlag	6,53	662,3
2. Schlag	5,96	352,6
3. Schlag	5,26	466,8
4. Schlag	4,70	370,8
Verdichten	4,21	-

Tab. 5.19: Messergebnisse aus Abb. 5.22

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm•s ⁻¹]
1. Schlag	6,67	473,6
2. Schlag	5,82	459,1
3. Schlag	5,12	363,5
4. Schlag	4,63	410,9
Verdichten	4,21	-

Tab. 5.20: Messergebnisse aus Abb. 5.23

Die Erhöhung oder Verminderung der Federkraft stellen eigentlich einen unzulässigen Eingriff in die normale Produktion dar. Dennoch zeigten sich auch bei dieser Messreihe bei der Sichtkontrolle brauchbare Ergebnisse des Stampfvorganges. Es wurden einige Versuche durchgeführt, wobei auch hier die Ergebnisse gleichartig waren. Weitere Eigenschaften der Versuchskohlen wurden auch bei diese Messreihe nicht überprüft.

5.6.5 4. MESSREIHE

Ziel der folgenden Messreihe ist, mögliche Einflüsse durch das Eintauchen des Stampfrohrs in die Kohle und den Einfluss des Kabels im Stampfrohr durch den Vergleich mit den vorher getätigten Versuchen festzustellen. Dazu wurde der Stampfvorgang ohne Kohlebürste gestartet und aufgezeichnet.

In der abschließenden Messreihe wurden zwei Messungen mit unterschiedlicher Schlagfrequenz mit dem Federsatz D ohne Veränderung der Stampfhöhe und des Stampfdruckes durchgeführt. Anstelle des Niveauschalters wurde der Initiator am Drehschieber in die Messung mit einbezogen, der für das Verdichten verantwortlich ist. Die Stampfung selbst erfolgte ohne Kohlebürste und Trichter für das Stampfpulver, also ohne Widerstand durch mögliche Reibungseinflüsse im Pulvertrichter und in der Kohlebürste. Die Aufzeichnungen dazu sind jeweils mit den Zeitbasen 20 ms und 50 ms paarweise nacheinander aufgezeichnet worden und in den nachstehenden Abbildungen dargestellt (Abb. 5.24 bis 5.27).

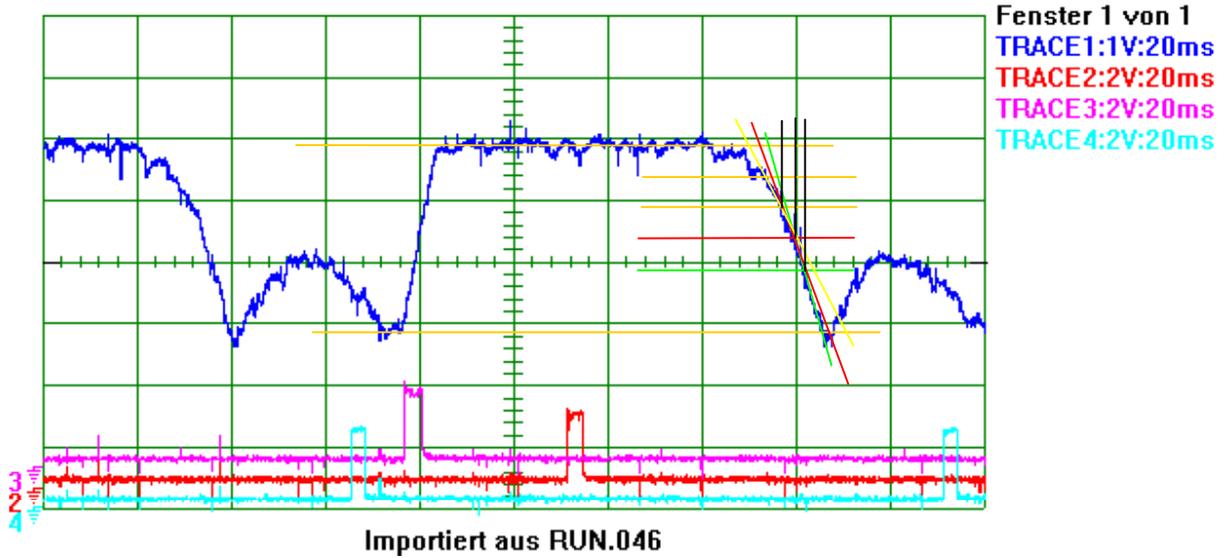


Abb. 5.24: Messung (Potentiometereinstellung 7)

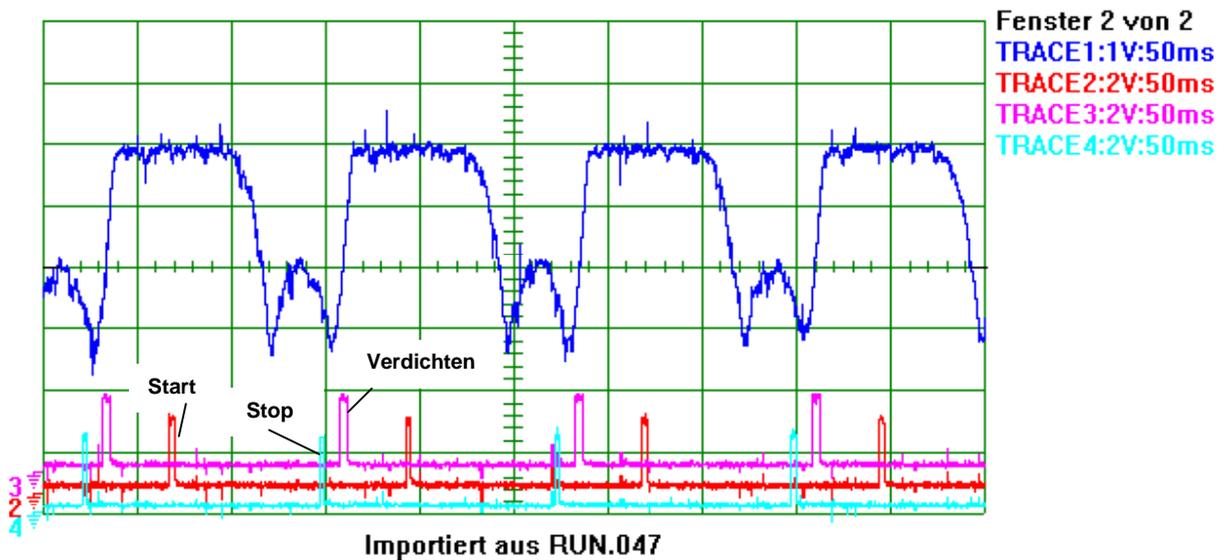


Abb. 5.25: Messung (Potentiometereinstellung 7)

In den Abb. 5.24 und 5.25 ist der gleiche Stampfvorgang zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet. Aus den eingetragenen Tangenten an die Bewegungskurve wurden drei Werte für Höhe und Geschwindigkeit ermittelt, aus Abb. 5.25 die Lage der Initiatoren. Aus dieser Abb. ist auch die Ähnlichkeit der aufeinander folgenden Bewegungen zu erkennen. Die zugehörige Frequenz beträgt dabei 8,01 Hz. In den Tabellen 5.21 und 5.22 sind die Ergebnisse festgehalten.

Messpunkt	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1	3,33	1058,2
2	5,00	1430,0
3	6,66	1904,7

Tab. 5.21: Messergebnisse aus Abb. 5.24

Messpunkte	Zeitabstand [ms]	Winkeldifferenz [Grad]
Start – Verdichten (V)	34,68	100,8
Verdichten (V) - Stop	77,62	225,8
Stop - Start	11,46	33,4

Tab. 5.22: Messergebnisse aus Abb. 5.25

Da der mechanische Widerstand des zu komprimierenden Stampfpulvers bei diesen Versuchen fehlt, ist ein Rückprallen des Stampfrohrs am Ende der Bewegung zu beobachten.

Zu Vergleichszwecken wurden die Aufzeichnungen mit einer anderen Frequenz wiederholt. Die Werte wurden ähnlich wie vorher ermittelt.

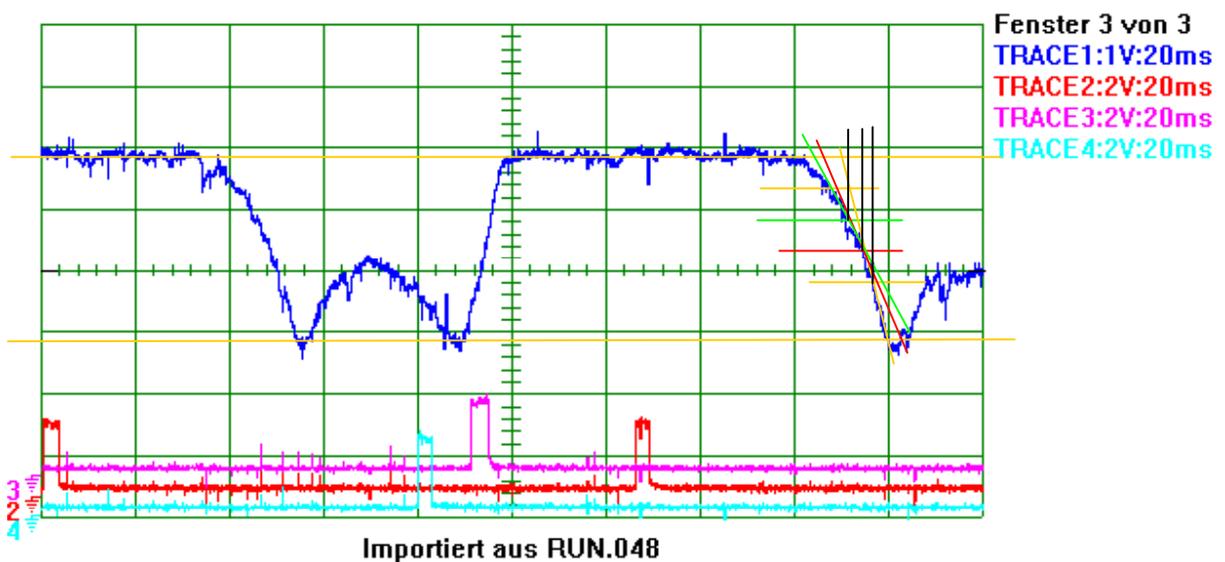


Abb. 5.26: Messung (Potentiometereinstellung 4,5)

In Abb. 5.22 ist bei diesem Versuch das Stampfen bei einer Taktdauer von 109,2 ms oder einer Frequenz von 9,1 Hz dargestellt.

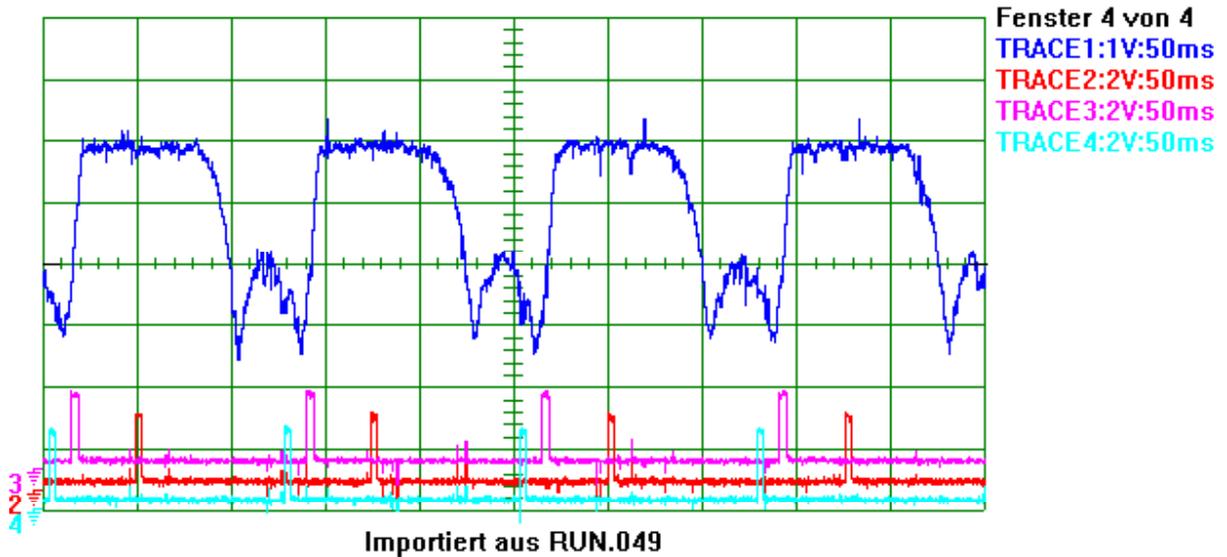


Abb. 5.27: Messung (Potentiometereinstellung 4,5)

In den Abb. 5.26 und 5.27 wurde für den gleichen Stampfvorgang, der wie oben zu verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet worden war, eine niedrigere Frequenz gewählt. Auch hier wurden aus den eingetragenen Tangenten an die Bewegungskurve drei Werte für Höhe und Geschwindigkeit ermittelt bzw. aus Abb. 5.27 die Lage der Initiatoren. Die zugehörige Frequenz beträgt dabei, 7,9 Hz. In den Tabellen 5.23 und 5.24 sind die Ergebnisse festgehalten.

Messpunkte	Höhendifferenz (Höhe) [mm]	Geschwindigkeit [mm·s ⁻¹]
1	3,33	1082,2
2	5,00	1349,0
3	6,66	2164,5

Tab. 5.23: Messergebnisse aus Abb. 5.26

Messpunkte	Zeitabstand [ms]	Winkeldifferenz [Grad] /Unterschied zu vorher
Start – Verdichten (V)	34,72	98,7 / - 2,1
Verdichten (V) - Stop	79,71	226,7 / - 0,1
Stop - Start	12,15	34,5 / + 1,1

Tab. 5.24: Messergebnisse aus Abb. 5.27

Weiter oben wurde der Messfehler mit besser 2% eingegrenzt. Aus dem Vergleich des gemessenen und des aus der Messung umgerechneten Winkel zeigt sich jedoch, dass der Messfehler etwas größer ist und zwischen 2 und 3 % liegen wird.

5.7 ANALYSE UND AUSWERTUNG DER MESSUNGEN

Zunächst fassen wir zusammen: frei wählbare Parameter beim Stampfvorgang sind die Schlagfrequenz, der Druck, mit dem das Stampfrohr gehoben wird, der Federsatz, das Niveau der Stampfung und die Gesamthöhe der Bewegung. In unseren Versuchsreihen wurden der Stampfdruck, die Gesamthöhe sowie das Niveau der Stampfung nicht verändert. Es existieren zwischen diesen Parametern Zusammenhänge. Vergrößert man beispielsweise die Gesamthöhe bei gleichem Niveau, bedeutet das einen höheren Hub im Pulvertrichter und durch die vergrößerte Öffnung eine Erhöhung der Pulvermenge. Dadurch verringert sich die Anzahl von Schlägen, die zur Füllung der Bohrung benötigt werden. Die bei sonst gleichen Parametern bedingte geringere Pressung ergibt wiederum veränderte mechanische und elektrische Eigenschaften des Stampfkontaktes.

Die Einschränkung, nur wenige Parameter zu variieren, war bei den Versuchen auch auf den Umstand zurückzuführen, die Produktion nicht zu lange zu unterbrechen.

5.7.1 DIE SCHLAGFREQUENZEN

Im nächsten Schritt sollen die Schlagfrequenzen untersucht werden. Die Schlagfrequenz ist von der Drehzahl des Drehschiebers direkt abhängig. Ordnet man markierten Einstellungen des Potentiometers für die Drehzahlverstellung den gemessenen Schlagfrequenzen zu, stellt man Abweichungen fest. In Tabelle 5.25 sind die Werte gegenübergestellt.

Potentiometer	Reihe 1 Frequenz [Hz]	Reihe 2 Frequenz [Hz]	Reihe 3 Frequenz [Hz]	Reihe 4 Frequenz [Hz]
4,5	8,0	7,8	8,0	7,9
5	9,1		8,2	
5,8	10,3			
6		8,0	8,2	
6,5	11,4			
7		8,2	9,1	8,0

Tab. 5.25: Zusammenstellung der Frequenzen

Obwohl ein annähernd lineares Verhältnis Potentiometerstellung/Drehzahl unterstellt werden durfte und die Ergebnisse lt. Tabelle 5.25 daher so nicht erwartet worden sind, spielen sie bei den weiteren Überlegungen keine entscheidende

Rolle, weil die gemessenen Zeiten feststehen und nur diese für die weiteren Betrachtungen relevant sind.

5.7.2 VERZÖGERUNG DER BEWEGUNGEN BEI KONSTANTER SCHLAGFREQUENZ

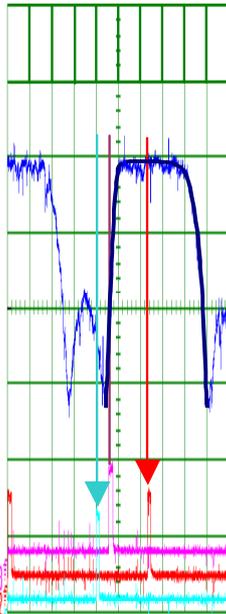


Abb. 5.28: Kurve

In einem weiteren Schritt sollen Verzögerungswerte der Bewegungen festgestellt werden. Dazu verwenden wir zunächst Abb. 5.26 (Messreihe 4), um diese durch Veränderung der ursprünglichen Breite der Aufnahme durch horizontale Stauchung vom Rastermaß 20 ms in eine Darstellung überzuführen, die dem Rastermaß für die Zeitbasis von 100 ms entspricht. Damit können die vorher abgelesenen Ergebnisse verglichen werden. Über die auf diese Art verzerrte Kurve legen wir die Umrisse als graphisch ermittelte Linie eines Mittelwerts der Bewegungslinie und weiters jene Fixpunkte, die auf Grund der Initiatoren am Drehschieber festgelegt sind. Das Ergebnis dieser Arbeitsschritte ist in der nebenstehenden Abb. 5.28 gezeigt. Die Kurve zeigt die maximal mögliche Bewegung des Stampfzylinders, die Pfeile werden als Einfügemarke für die weiteren Untersuchungen verwendet. Die so ermittelte Kurve fügen wir in die passenden vorher durchgeführten Messungen ein. Für die weiteren Überlegungen teilen wir den Bewegungsablauf in die Phasen „Heben“, „Halten“ und „Senken“.

Die erste Phase, Heben, zeigt einen deutlichen Unterschied des zeitlichen Verhaltens mit und ohne Kohlebürste, der bezüglich der Deutlichkeit der Unterschiede so nicht erwartet worden ist. Betrachtet man die Anordnung mit Kohlebürste, könnte man zumindest beim Heben erwarten, dass zeitlich gesehen die Bewegungen nahezu deckungsgleich erfolgen, da beim Herausziehen des Stampfrohrs aus der Kohlebürste sich eventuell verkeilte Pulverpartikel lösen und daher Reibungsverluste tendenziös immer kleiner werden müssten. Dieser Umstand ist im Rahmen der vorher diskutierten Ungenauigkeit der Aufzeichnung auch erkennbar. Für den überwiegenden Anteil der Zeitverzögerung verbleibt jedoch nur der Anteil der Reibung des Kupferseils im Stampfrohr selbst und an einer Klemmzange, durch die das Kabel durchgeführt wird. Im Fall der freien Bewegung fallen diese bremsenden Einflüsse zur Gänze weg¹⁷.

¹⁷ Üblicherweise wird, um das Kabel nicht neuerlich einfädeln zu müssen, das freie Kabelende beim Stampfen ohne Kohlebürste umgebogen. Der dadurch zusätzlich entstehende Luftwiderstand wurde nicht untersucht. Festzustellen ist noch, dass speziell auf die Behandlung der äußeren Oberfläche des Stampfrohrs besonders geachtet wird.

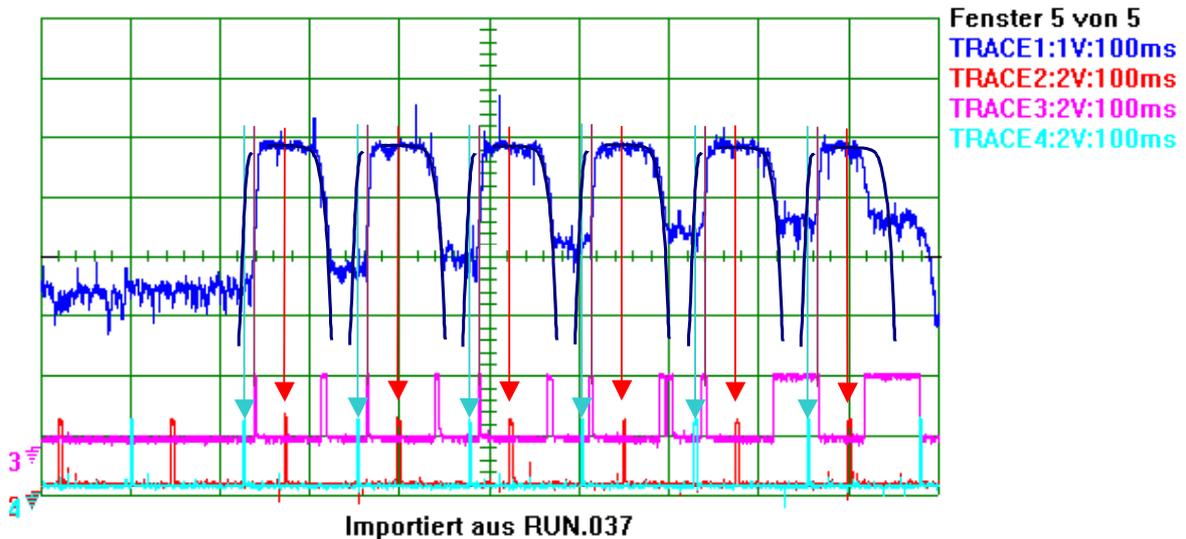


Abb. 5.29: Auswertung aus MR 1 (8 Hz)

Nach der bekannten Methode wurden die Werte in Tabelle 5.26 zusammengefasst. Die Vorzeichen sind auf die tatsächlichen Werte bezogen, wobei das negative Vorzeichen die Verspätung beim Heben bzw. Senken angibt.

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 13,3	- 00,0
2	- 14,4	- 01,1
3	- 13,3	- 02,2
4	- 13,3	- 02,2
5	- 12,2	- 01,1
Verdichten	- 12,2	+ 18,8

Tab. 5.26: Zeitunterschied 1

Zum Verdichtungsschlag ist anzumerken, dass der Zeitunterschied und die Richtung der Verschiebung gewollt ist, dass aber bei der ursprünglichen Definition des Zweckes festgelegt worden ist, dass beim Verdichten nahezu kein Pulver mehr nachfließen sollte. Das heißt, zumindest für die hier betrachteten Aufzeichnungen, dass die Initiatoren am Drehschieber nicht korrekt angeordnet sind. Diese Feststellung wird uns bei der Beantwortung der Frage, wo die Schaltpunkte liegen sollten, noch beschäftigen. Zunächst wollen wir die weiteren Messreihen mit der gleichen Methode untersuchen. Dazu wählen wir die Messung laut Abb. 5.28 aus, die ebenfalls eine Stampfung mit der Frequenz von 8 Hz darstellt.

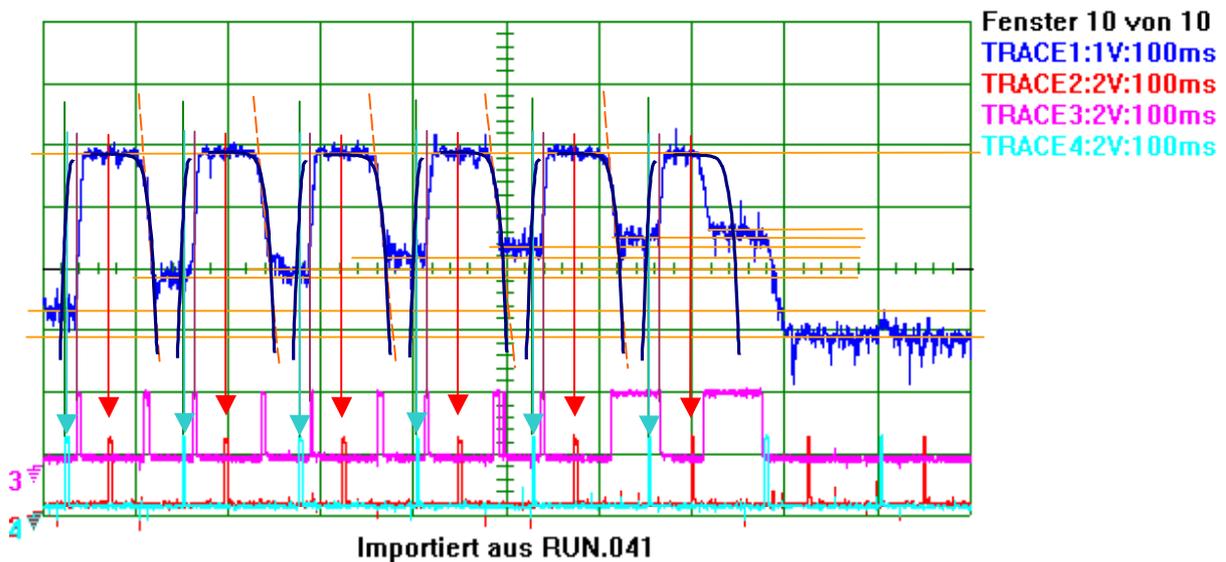


Abb. 5.30: Auswertung aus MR 2 (8 Hz)

Die Werte sind in Tabelle 5.27 zusammengefasst.

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 16,6	- 00,0
2	- 15,0	- 00,0
2	- 15,0	- 02,2
4	- 14,4	- 01,1
5	- 13,3	- 00,0
Verdichten	- 13,3	+ 25,5

Tab. 5.27: Zeitunterschied 2

Im Vergleich zu den vorher ermittelten Werten existiert ein Zeitunterschied, der auf die Verstärkung der Zugfedern zurückgeführt werden kann.

Auch bei der dritten Messreihe wurde eine Aufzeichnung mit einer Schlagfrequenz von 8 Hz festgehalten. In der Abb. 5.31 sind die konstruktiven Arbeitsschritte dokumentiert, in der zugehörigen Tabelle 5.30 die Ergebnisse zusammengestellt.

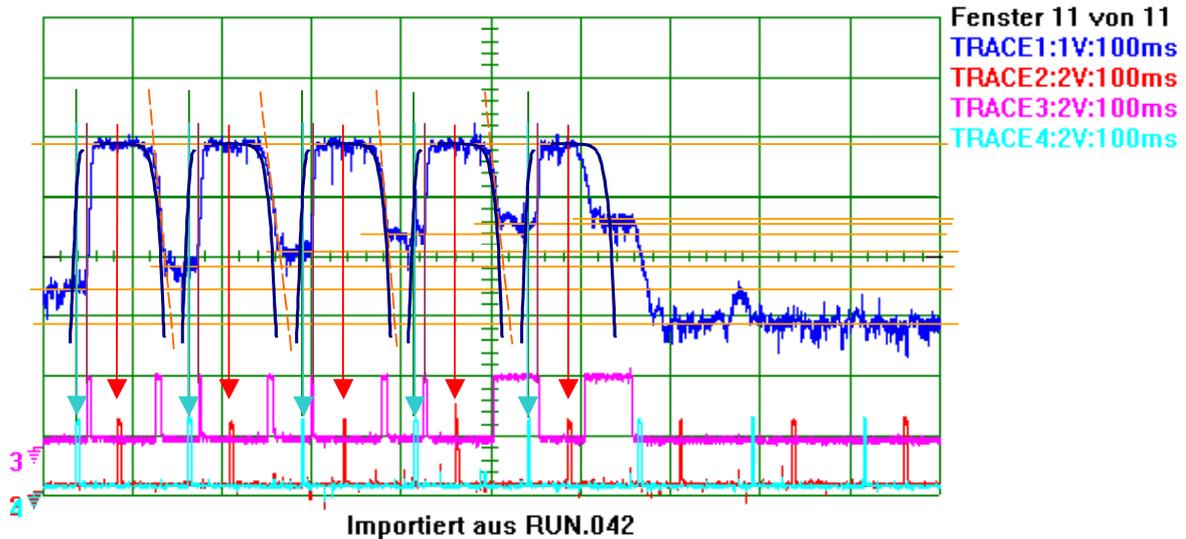


Abb. 5.31: Auswertung aus MR 3 (8 Hz)

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 16,6	- 03,3
2	- 15,5	- 04,4
2	- 12,2	- 02,2
4	- 14,4	- 02,2
Verdichten	- 12,2	+ 21,1

Tab. 5.28: Zeitunterschied 3

Im Vergleich zu den vorher ermittelten Werten kann man feststellen, dass die hier ermittelten Ergebnisse die vorher durchgeführten Überlegungen bestätigen konnten.

5.7.3 VERZÖGERUNG DER BEWEGUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHER SCHLAGFREQUENZ

Wir wenden nun die vorher definierte Vorgehensweise auf die nach der 1. Messreihe noch nicht untersuchten Aufnahmen an. Dazu müssen zuerst die Kurven an die Frequenz angepasst werden. Im einzelnen gehen wir dabei analog zu der in Abb. 5.25 erläuterten Art vor, verzichten jedoch auf die Darstellung der Entwicklungsschritte, sondern stellen nur die Auswertungsschritte als Abbildungen und die Zeitunterschiede als Tabellen dar. Anschließend werden wir die Ergebnisse kurz diskutieren.

Konstant für diese Auswertungen bleiben die Zugfedern, der Stampfdruck und die Hubhöhe. Abb. 5.32 stellt die Grundlage zur Auswertung bei einer Frequenz von 9,1 Hz, Tab. 5.27 die zugehörigen Ergebnisse dar.

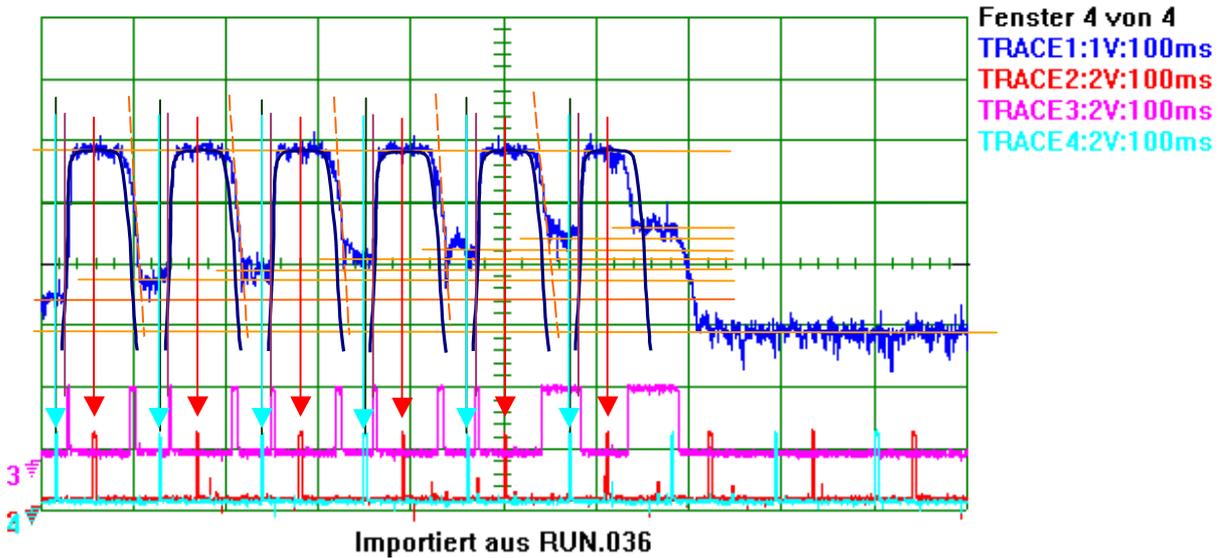


Abb. 5.32 : Auswertung aus MR 1 (9,1 Hz)

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 4,3	- 7,1
2	- 0,0	- 7,1
3	- 0,0	- 7,1
4	- 0,0	- 5,7
5	- 0,0	- 7,1
Verdichten	- 0,0	+ 9,3

Tab. 5.29: Zeitunterschied 4

Abb. 5.33 stellt die Grundlage zur Auswertung bei einer Frequenz von 10,3 Hz, Tab. 5.28 die zugehörigen Ergebnisse dar.

Abb. 5.34 stellt die Grundlage zur Auswertung bei einer Frequenz von 11,4 Hz, Tab. 5.29 die zugehörigen Ergebnisse dar.

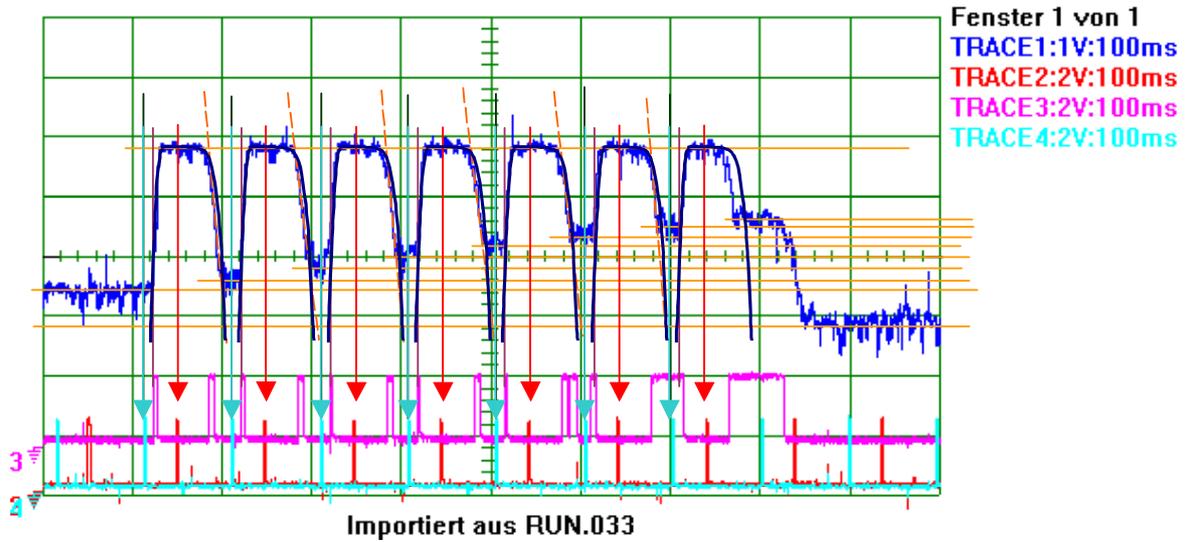


Abb. 5.33 : Auswertung aus MR 1 (10,3 Hz)

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 1,4	- 04,3
2	- 0,0	- 05,0
3	- 0,0	- 02,9
4	- 0,0	- 03,6
5	- 0,0	- 02,9
7	- 0,0	- 02,9
Verdichten	- 0,0	+ 11,4

Tab. 5.30: Zeitunterschied 5

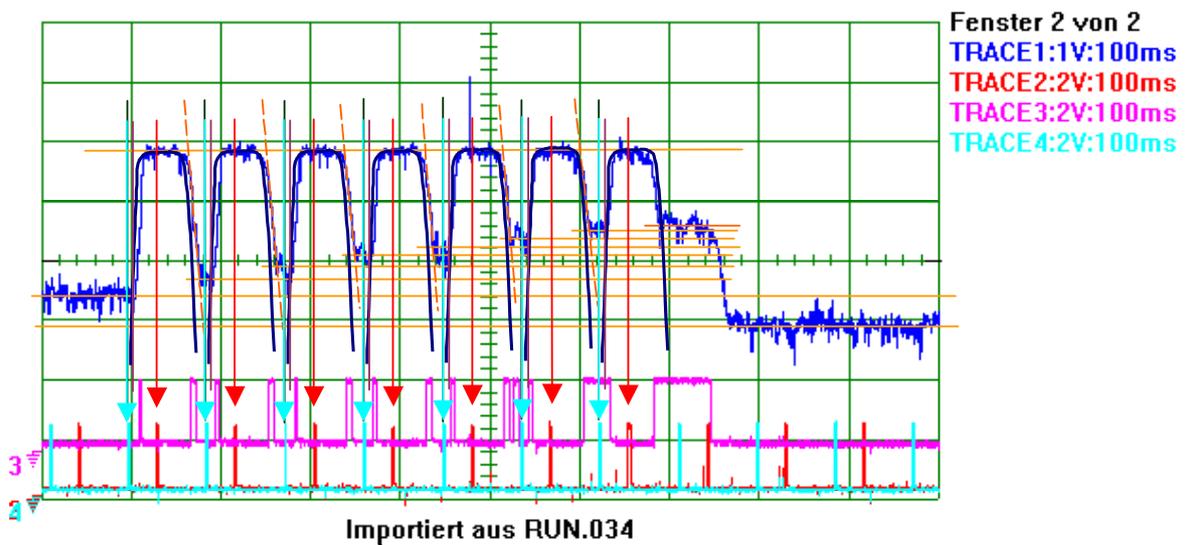


Abb. 5.34: Auswertung aus MR 1 (11,4 Hz)

Schlagbewegung	Zeitunterschied Heben [ms]	Zeitunterschied Senken [ms]
1	- 5,0	- 5,7
2	- 5,7	- 5,0
3	- 2,8	- 5,0
4	- 2,8	- 4,3
5	- 1,4	- 4,3
6	- 0,0	- 2,9
Verdichten	- 1,4	+ 4,3

Tab. 5.31: Zeitunterschied 6

In den folgenden Abbildungen ist das Bewegungsverhalten nochmals verdeutlicht. Abb. 5.35 zeigt die Zeitwerte bei gleichem Druck und unterschiedlichen Feder-sätzen. In der Ordinate sind die Verzögerungen in ms, in der Abszisse die Verdichtungsschläge, wobei der letzte Schlag den Verdichtungsschlag anzeigt.

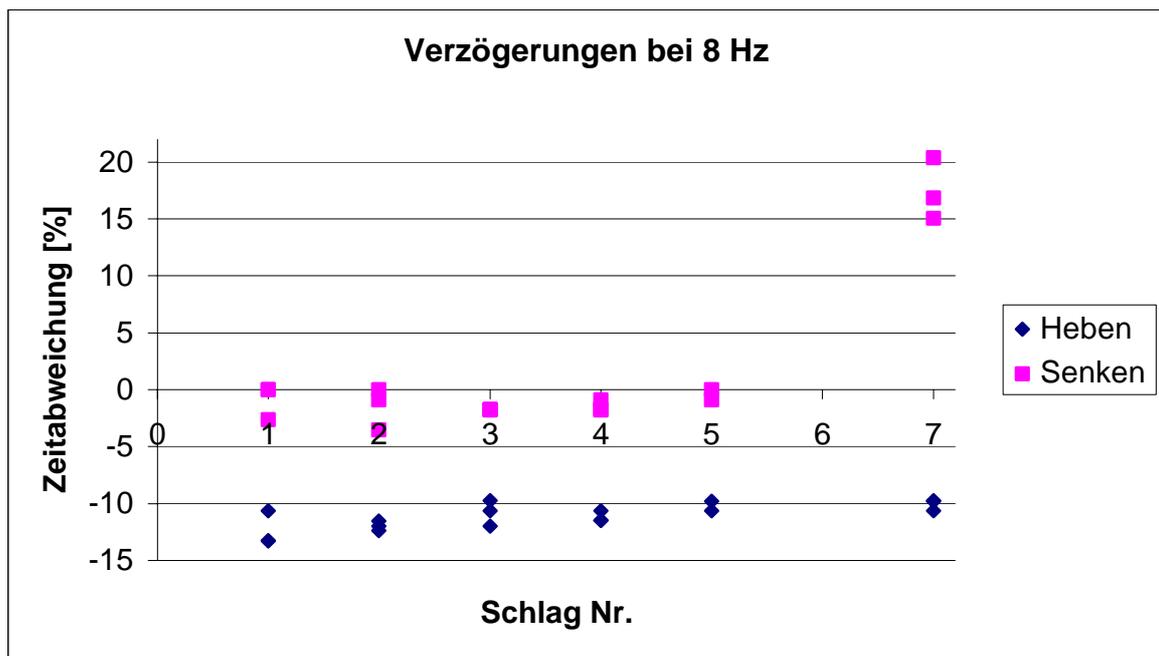


Abb. 5.35 : Zeitverzögerungen Heben/Senken bei 8 Hz

Sieht man vom Verdichtungsschlag ab, der eine Sonderstellung einnimmt, zeigt sich, dass die Zeitverzögerungen beim Senken als deutlich geringer festgestellt wurden als jene beim Heben. Da wir als Referenz eine Art von „Normschlag“ herangezogen haben, kann die Verzögerung beim Heben nicht mit den zu erwartenden Verzögerungen, die durch das Verhalten der antreibenden Druckluft erklärt werden, wie wir sie weiter oben bereits diskutiert haben.

In Abb. 5.36 sind die Zeitwerte bei gleichem Druck, dem Federsatz D aber unterschiedlichen Schlagfrequenzen gezeigt. In der Ordinate sind ebenfalls die Verzögerungen in ms und in der Abszisse die Verdichtungsschläge anzeigt.

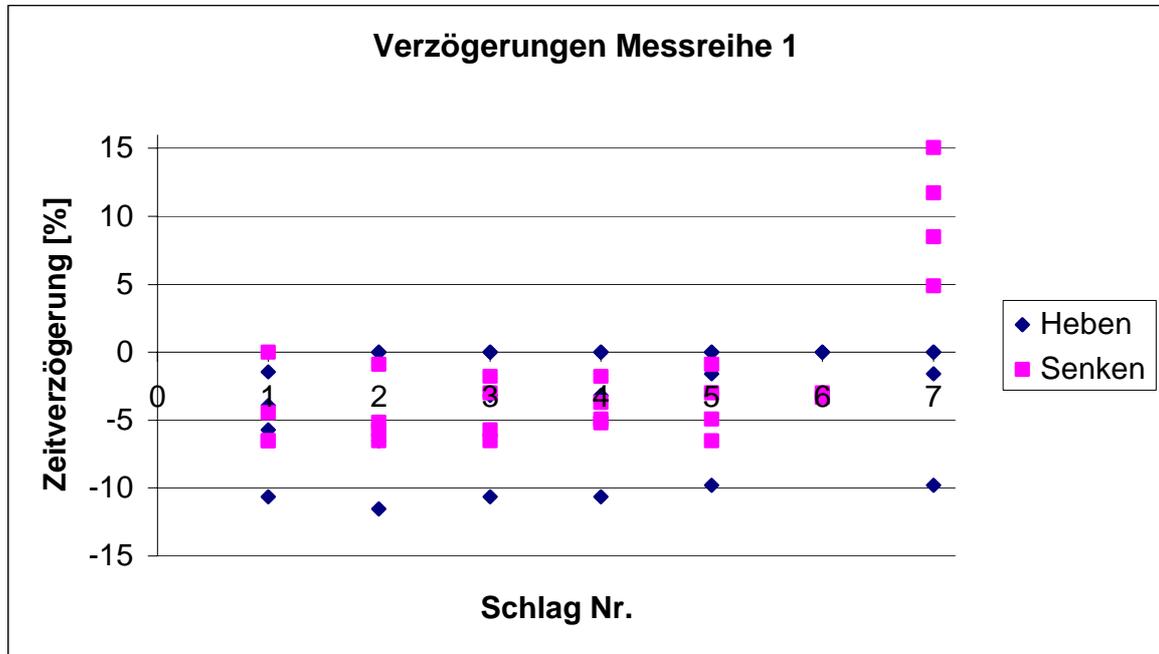


Abb. 5.36 : Zeitverzögerungen Heben/Senken bei 9,1 bis 11,4 Hz

Laut Abb. 5.36 werden hier beim Heben deutlich geringere Zeitverzögerungen festgestellt, als im vorhergehenden Bild, beim Senken jedoch größere. Die Verzögerungen beim Heben bei einer Frequenz von 8 Hz ist die in der Abbildung gezeigte Reihe, die um die -10% Linie angeordnet ist, und zeigt, dass bei dieser Frequenz sich das Verhalten des Stampfrohrs deutlich unterscheidet. Es ist zu vermuten, dass Resonanzerscheinungen bei höheren Frequenzen eine Rolle spielen.

Ein Anteil für die Zeitverzögerung beim Senken kann wie folgt erklärt werden: das Stampfpulver im Trichter verschließt beim Füllen durch sein Nachfließen jenen Weg, den das Stampfrohr bei der Abwärtsbewegung zurückzulegen hat. Das Stampfrohr verdrängt dabei eine Menge Pulver auch zur den Seiten, wodurch eine bremsende Wirkung gegeben ist.

Zusammenfassend stellen wir fest, dass einige Ursachen für die Zeitverzögerung bei den Bewegungsvorgängen diskutiert worden sind. Anzumerken ist zur Verzögerung durch Reibung am Kabel, dass bei der Zange, die dieses Kabel beim Senken festhält, auf Grund ihrer Konstruktion eine Spannwirkung durch einen

Zylinder erfolgt, die Entspannung, also das Öffnen der Zange hingegen, nur der Schwerkraft überlassen wird, in dem die Spannbacken einfach losgelassen werden. Diese nur lose geführten Spannbacken berühren also bei der Bewegung des Stampfrohrs ständig das bereits in der Bohrung festgehaltene und genau genommen frei hängende Kabel¹⁸. In diesem Zusammenhang wird über konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung nachgedacht¹⁹.

5.7.4 WEITERE ÜBERLEGUNGEN ZUR ABSCHÄTZUNG DES MESSFEHLERS UND ZUR MESSMETHODE

Auf Grund der Eindeutigkeit des Trends, den die erste Auswertungsreihe gezeigt hat, sind die nun gewonnenen Ergebnisse nicht mehr so einfach einzuordnen. Dazu einige Anmerkungen zur Konstruktion der über das Bild gelegten Kurve.

Es ist davon auszugehen, dass die konstruierte Kurve im Rahmen der schon vorher diskutierten Messgenauigkeit liegt. Sie ist dadurch entstanden, dass das Bild der Einzelmessung beim freien Bewegungsablauf bei hoher Vergrößerung die Vorlage einer „Transparent-Pause“ gewesen ist. Dass die vorgenommene Stauchung mit der Realität übereinstimmt, zeigt die relative Genauigkeit der Einfügepunkte. Eher problematisch ist die Abnahme von Längenabständen von einer Zeichnung, oder, wie es hier der Einfachheit halber durchgeführt wurde, direkt unter Verwendung eines Maßstabes vom (Flach-) Bildschirm. Eine derartige Längenmessung kann etwa auf 0,5 mm genau durchgeführt werden. Dazu tritt erschwerend dazu, dass auf Grund des hohen Vergrößerungsfaktors (500%) die dargestellten Strichstärken relativ dicke Maßlinien erzeugen, wodurch zusätzliche Ungenauigkeiten beim Ablesen entstehen. Je nach Größe des Bildschirms sind für Abstände der Gitterlinien 71 mm bzw. 90 mm gemessen worden. Bezieht man diesen Wert auf die in unseren Fällen überwiegend enthaltene Zeitbasis von 100 ms, ergibt sich daraus der mögliche Messfehler von $\pm 0,7$ ms.

Ein weiterer störender Einflussfaktor ist, dass die Kurven in das ursprüngliche Bild kopiert und passend positioniert werden mussten, wodurch eine zusätzliche Fehlermöglichkeit entstanden ist.

Betrachtet man die Werte in Relation zum Bereich der üblichen Schlagfrequenzen zwischen 8 Hz und 12 Hz bedeutet ein Grad Winkeldifferenz einen Zeitraum, der zwischen 0,3 ms und 0,2 ms liegt. Dieser Umstand erscheint in Relation zu den Reaktionszeiten der Steuerung tolerierbar.

¹⁸ Wäre das Kabel gespannt, würde es unter Umständen beim Stampfvorgang aus der Bohrung herausgezogen werden können.

¹⁹ Zum Beispiel durch federnde Zangen, die über Federkraft offen gehalten werden.

5.7.5 DER EINFLUSS DER ZUGFEDERN

Schließlich soll noch der Einfluss der verwendeten Federsätze in die Betrachtungen mit einbezogen werden. In den Abbildungen 5.37 bis 5.39 sind die ermittelten Geschwindigkeiten mit Zuordnung der verwendeten Federsätze zum Zeitpunkt des Verdichtens zusammengestellt.

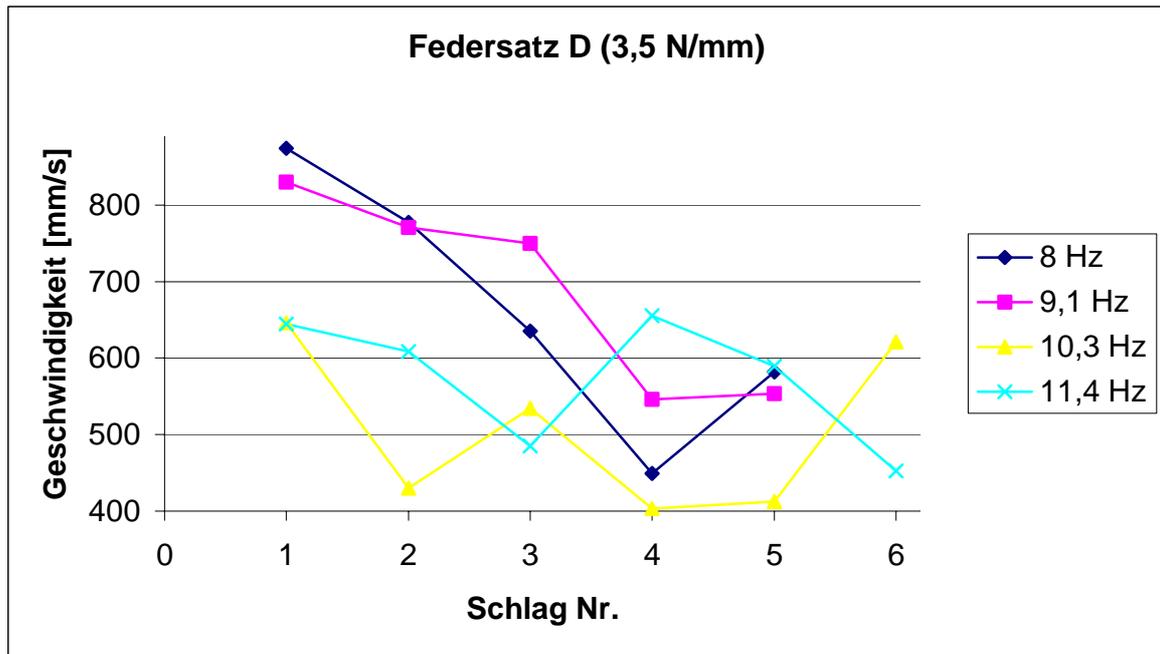


Abb. 5.37 : Federsatz D

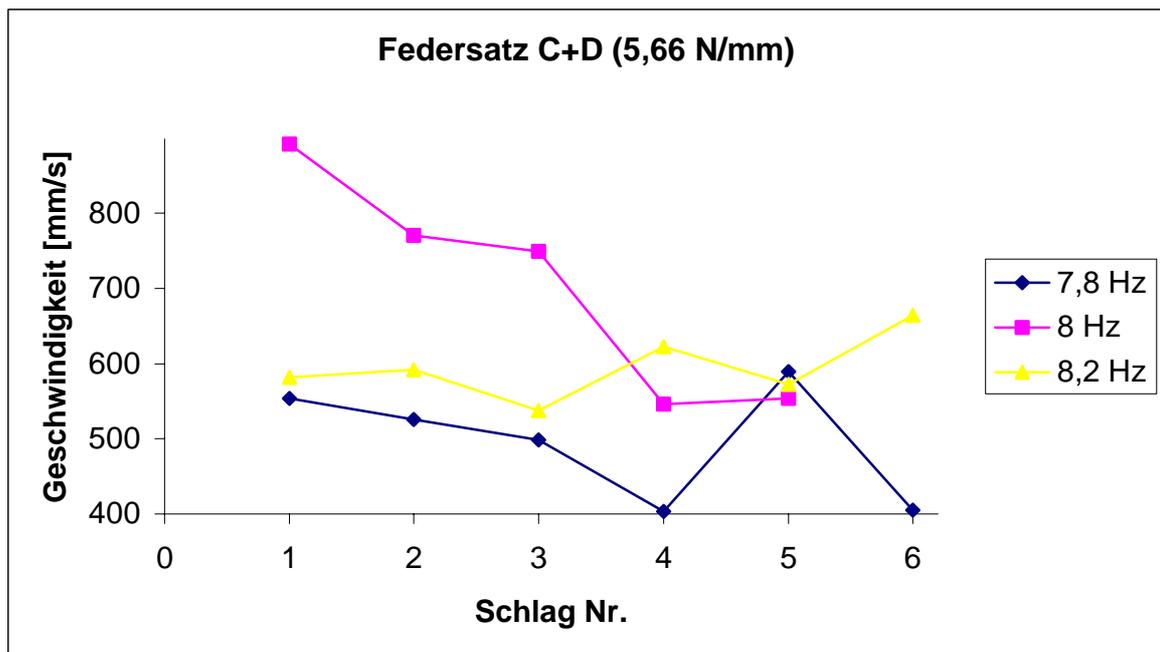


Abb. 5.38 : Federsatz C+D

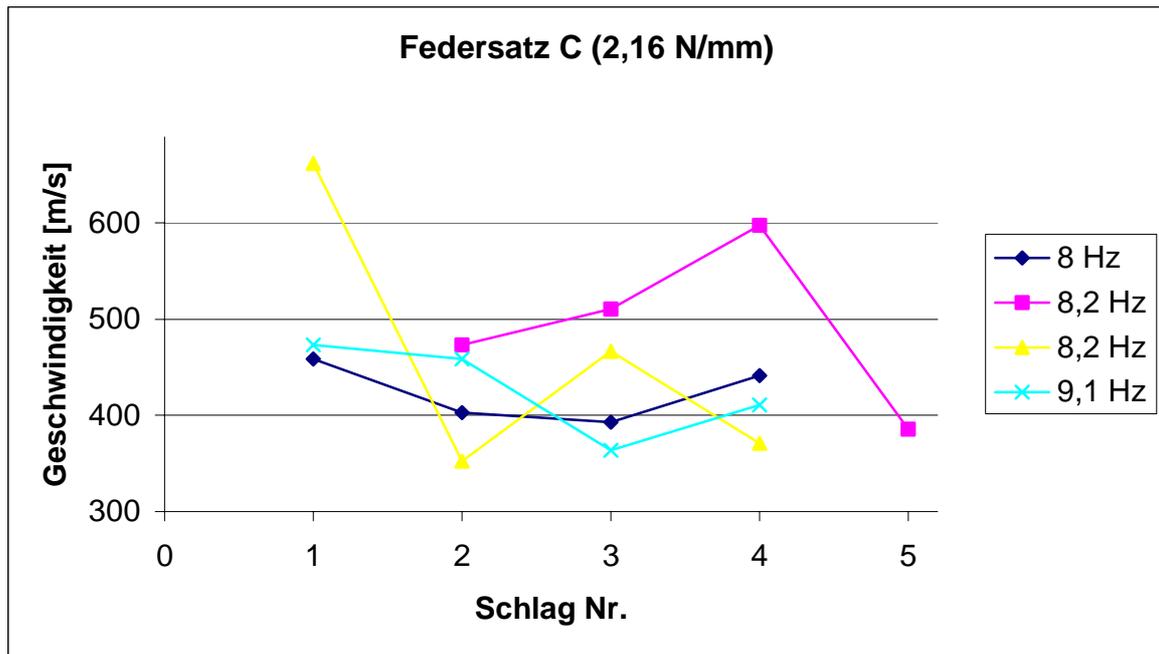


Abb. 5.39 : Federsatz C

Die Zugfedern dienen grundsätzlich der Erhöhung der Geschwindigkeit und dadurch der umgesetzten Schlagenergie beim Verdichtungsvorgang. Betrachtet man die in den einzelnen Messreihen aufgenommenen Aufzeichnungen mit den dort angelegten Tangenten zur Geschwindigkeitsermittlung, sind diese angenähert parallel innerhalb der einzelnen Aufzeichnungen. Das heißt, die Geschwindigkeiten sollten zumindest annähernd in der gleichen Größenordnung liegen. Sieht man von den auswertungsbedingten Fehlern ab, sollte die Geschwindigkeit mit der Nummer des betrachteten Schlages sinken, ähnlich wie dies in den Aufzeichnungen der letzten Messreihe gezeigt worden ist. Eine derartige Tendenz ist bei einigen Linienzügen der Abbildungen 5.37 bis 5.39 auch erkennbar.

Bezogen auf den Wertebereich wird die Tendenz zur Verminderung der Geschwindigkeit mit steigender Schlagzahl in Abb. 5.37 erkennbar. Vergleicht man die Auswertungen Abb. 5.37 mit Abb. 5.38, ist die erwartete deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit durch Verstärkung des Federsatzes nicht bestätigt worden.

In diesem Zusammenhang soll noch angemerkt werden, dass die Federsatzes ursprünglich durch Länge, Durchmesser und Stärke des Federdrahtes bestimmt worden sind. Dabei wurden beim erstmaligen Nachmessen der Zugkräfte der Federn sehr große Fertigungsunterschiede festgestellt, so dass nunmehr nur definierte und nach der Herstellung geprüfte Federn Verwendung finden.

5.7.6 DIE SCHLAGENERGIE

Die Schlagenergie ist abhängig von der bewegten Masse des Stampfrohrs und der Geschwindigkeit beim Auftreffen auf das Stampfpulver. Die Berechnung dieser Energie erfolgt nach Formel 1.1. Während die Masse des Stampfrohrs konstruktiv bestimmt und konstant ist, ist die Geschwindigkeit durch die oben diskutierten Einflüsse veränderbar. Es werden die Messergebnisse der Messreihe 4 den Werten der anderen Messreihen gegenüber gestellt. Als Bezugsfrequenz wird 8 Hz gewählt, weil für diese Frequenz in allen Messreihen Ergebnisse vorliegen. In Abbildung 5.40 sind die Werte zusammengefasst dargestellt.

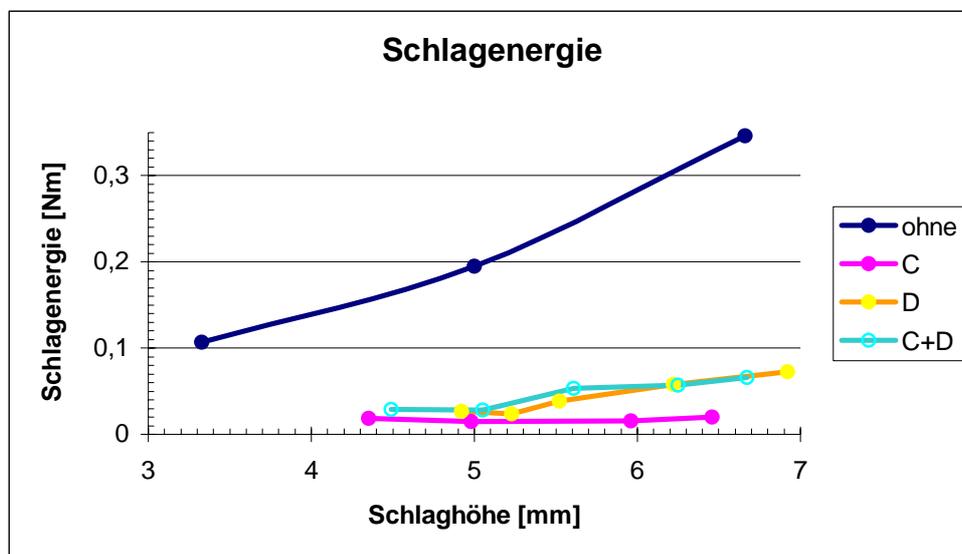


Abb. 5.40: Schlagenergie mit/ohne Federn

Abbildung 5.40 zeigt den dämpfenden Einfluss der Maschine. Messreihe 4 zeigt die freie Bewegung, also ohne dämpfende Einflüsse durch Reibung im Pulvertrichter oder in der Kohle. Die Schlagenergie ohne bremsende Einflüsse liegt im Bereich von 0,15 bis 0,35 Nm, mit Kohle, beim Stampfvorgang eine Zehnerpotenz niedriger. Um den Einfluss der Federn deutlicher hervorzuheben, wurden in Abbildung 5.41 die Messreihe 4 nicht mehr dargestellt.

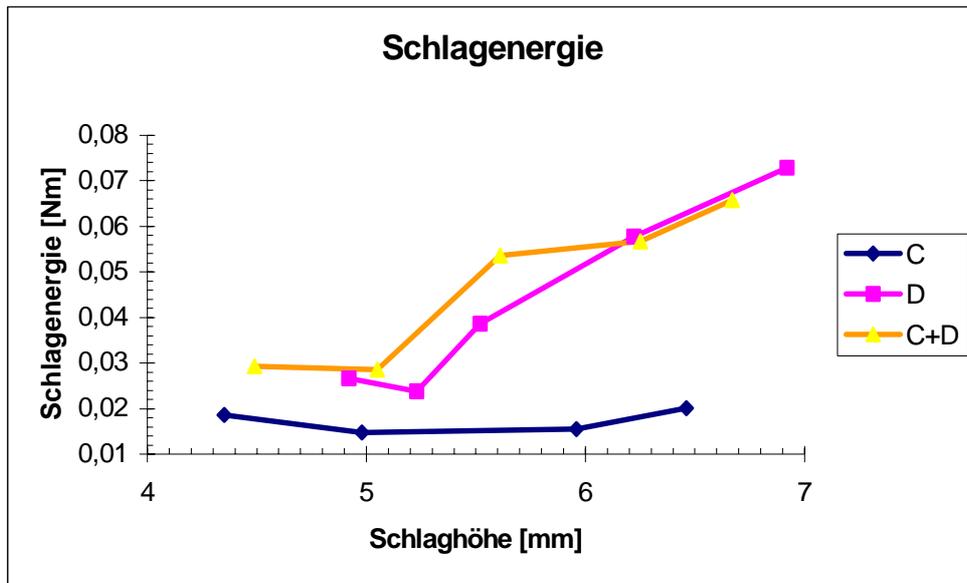


Abb. 5.41: Einfluss der Federn auf die Schlagenergie

Abbildung 5.41 zeigt, wie erwartet, dass die Verstärkung der Federkraft zur Erhöhung der Schlagenergie führt. Damit können die Verdichtung und die damit verbundenen Parameter beeinflusst werden.

Zuletzt werden noch die mittleren Geschwindigkeiten beim Auftreffen auf das Stampfpulver unter dem Einfluss der Federkraft untersucht. Bei der Messreihe 3 wurde der schwächste Federsatz C (2,16 N/mm) eingesetzt und eine mittlere Geschwindigkeit von 423,95 mm/s erreicht, bei Reihe 1 der Federsatz D (3,5 N/mm) die Geschwindigkeit 662,86 mm/s und bei Reihe 2 der Federsatz C+D (5,66 N/mm) 690,02 mm/s. In Abbildung 5.42 sind diese Werte graphisch dargestellt.

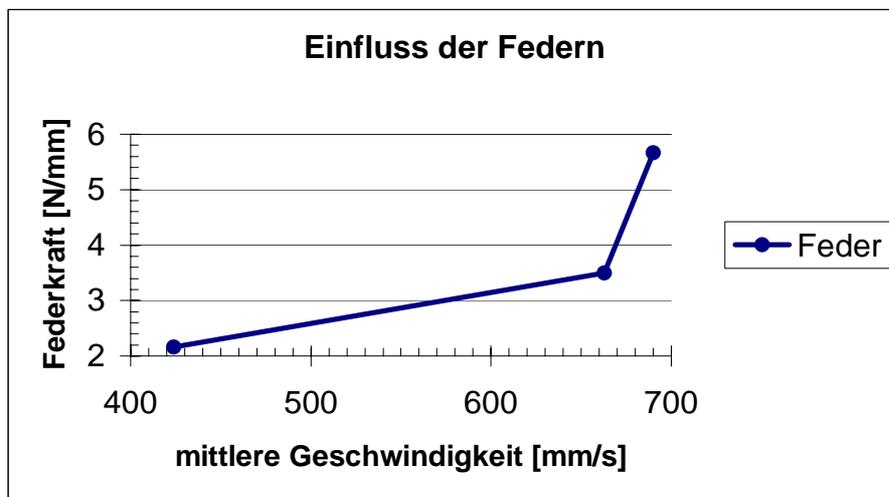


Abb. 5.42: Einfluss der Federn auf die mittlere Geschwindigkeit

5.7.7 ZUSAMMENFASSUNG

Die dämpfenden und damit bremsenden Einflüsse der Abwärtsbewegung sind in der ermittelten Größe nicht erwartet worden, da speziell auf die Einhaltung ausreichender Toleranzen, wie beispielsweise symmetrische Aufhängung der Federn, Einstellung des Stampfrohrs im Zentrum der Bohrung, etc., bei der Maschineneinstellung geachtet worden ist.

Diese dämpfenden Einflüsse sind im Wesentlichen die Reibungsverluste durch das Stampfrohr im Pulvertrichter²⁰ und das Kabel nebst der Klemmzange innerhalb der Kabelführung durch das Stampfrohr.

Bestätigt wurde die Erwartung der Steigerung der Schlagenergie durch Verstärkung der Zugfedern. Die Erwartung, durch die Zugfedern eine annähernd lineare Steigerung der Schlaggeschwindigkeit zu erzielen, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Die fehlende Linearität erschwert das Vorherbestimmen der Schlagenergie. Vermutet wird, dass eine Mengenbeschränkung der ausströmenden Luft zu diesem Verhalten beiträgt.

Es existiert auch ein Zusammenhang zwischen der Schlagfrequenz und der erreichbaren Geschwindigkeit. Als Ursache wird das Entlüftungsverhalten des Drehschiebers vermutet, der bei niedrigeren Frequenzen langsamer öffnet.

Die genaue Analyse der Aufzeichnungen der Bewegungsabläufe hat auch ergeben, dass die Schlaggeschwindigkeiten mit steigender Anzahl der Schläge tendenziell kleiner werden, erklärbar durch die geringer werdende Fallhöhe, jedoch unvorhersehbar sowohl positiv als auch negativ von dieser Tendenz abweichen können. Als Ursache dafür kommen sowohl das Entlanggleiten des Stampfrohrs am Kabel, als auch Verkeilen von Pulverpartikeln im Pulvertrichter oder in der Kohlebürste, in Frage.

Das in Kapitel 4 vorgestellte Modell der Schlagbewegung hat sich auf Grund der Messergebnisse für die Untersuchung der Luftimpulserzeugung durch den Drehschieber als nicht brauchbar erwiesen. Möglichkeiten zur Erzeugung von Stampfimpulsen mittels Luftdruck werden im Kapitel 7 noch einmal aufgegriffen.

²⁰ Anzumerken ist, dass die Fa. *Schunk* bei der untersuchten Maschine bereits einen, gegenüber der Normalausführung veränderten Pulvereinlauf (steilere Schüttwinkel) konstruiert hatte, der bei dieser Versuchsanordnung eingesetzt wurde.

6. QUALITÄTSKRITERIEN UND NACHWEISE DEREN EINHALTUNG

Dieser Abschnitt behandelt Qualitätskriterien von Stampfkontakten, die messtechnisch erfassbar sind und für die Qualitätssicherung herangezogen werden. Dabei unterscheidet man zwischen nicht zerstörenden Messungen, wie für den Übergangswiderstand zwischen Kohlebürste und Kabel, der auch auf einigen Fertigungseinrichtungen bei jedem erzeugten Stampfkontakt überprüft und protokolliert wird und zerstörenden Messungen, wie die Ausreißfestigkeit des eingestampften Kabels¹.

Es existieren eine Reihe von Vorschriften, unter anderem über Messmethoden, Arten der Probenentnahme, etc., für Kohlenstoffmaterialien (vgl. [DIN221]). Einerseits sind derartige Vorschriften genormt, andererseits existieren an Vorschriften angelehnte Messvorschriften und Vorgehensweisen, die sowohl von den Herstellern von Kohlebürsten wie auch von den Anwendern oder weiterverarbeitenden Betrieben erstellt worden sind. Diesen Richtlinien wurden weitgehend berücksichtigt, wobei auch neue Ansätze vorgestellt werden.

6.1 MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS BEI DER VERPRESSUNG

Festigkeit und elektrische Leitfähigkeit werden nicht nur durch die Eigenschaften der verwendeten Grundmaterialien, sondern auch vom Herstellungsprozesses mitbestimmt. Um die Materialeigenschaften des Stampfpulvers zu bestimmen, wurden zunächst Pressversuche mit einigen hauptsächlich verwendeten Stampfpulvern vorgenommen.

6.1.1 PROBENHERSTELLUNG FÜR DIE ERSTE VERSUCHSREIHE

Ziel der Versuche war es, das Verhalten der Stampfpulver bei ihrer Verpressung zu untersuchen. Bei diesen Untersuchungen interessierten Eigenschaften wie Grad der Verpressung sowie mechanische und elektrische Eigenschaften.

Stampfpulver wird bei der Herstellung von Kohlebürsten solange bearbeitet, bis eine ausreichend feste Verbindung zum Kabel hergestellt worden ist. Dabei entsteht, je nach dem Grad der vorgenommenen Verpressung, ein fester Körper.

¹ Selbst wenn die Messung vor Erreichen einer Bruchgrenze abgebrochen wird, wird ein Prüfling auf Grund der durch die Messung vorgenommenen Beanspruchung ausgeschieden.

Derartige feste Körper herzustellen war der vorbereitende Schritt für die darauf folgenden Messungen.

Für die Herstellung der Probekörper für die folgende Versuchsreihe, diese werden in der Folge als "Presslinge" bezeichnet, stand eine Pulverpresse zur Verfügung, auf deren Druckanzeige der jeweilige Pressdruck mit einer Ablesegenauigkeit in Schritten von 0,1 [t]² ablesbar waren.

Verwendet wurde ein vorhandenes Gesenk³ mit den Abmessungen 6,85 x 7,85 x 43 mm. Bei den Versuchen wurde jeweils das Gesenk mit dem zu prüfenden Stampfpulver vollständig gefüllt, die Oberfläche mit einem Lineal glattgestrichen und danach der Pressvorgang durchgeführt⁴.

Die untersuchten Prüflinge wurden im Werk Heuchelheim der *Fa. Schunk* hergestellt.

Als Ausgangsmaterial für die Probenherstellung wurden jene Stampfpulver ausgewählt, die am häufigsten bei der Produktion von Kleinkohlen Verwendung finden⁵.

² t = Tonne, 1000 kg. Der Gewichtskraft einer Masse von 100 kg entsprechen 980,665 N an einem Ort mit der Norm-Schwerebeschleunigung [vgl. Wal94].

³ Gesenk Nr. 2511 der *Fa. Schunk* (Werk Heuchelheim).

⁴ Der gesamte Messvorgang war relativ zeitaufwendig. Die verwendete Presse erlaubte zwar, diese Vorgänge automatisiert ablaufen zu lassen, jedoch muss bei der automatisierten Herstellung der Prüflinge eine große Menge des Pulvers bereitgestellt werden. Daher wurde das Gesenk nur händisch gefüllt, die Oberfläche abgestrichen und der Pressvorgang danach mit der Sicherheitsschaltung ausgelöst. Einmal blieb durch eine Fehlbedienung die Presse sogar stecken und zur Weiterführung der Versuche musste das Untergesenk ausgebaut und der Prüfling entfernt werden.

⁵ Praktischerweise standen genau diese Pulver für die Versuche in ausreichender Menge zur Verfügung. Es existieren für spezielle Anwendungen auch andere Pulvermischungen.



Abb. 6.1: Pressentisch der 15 Tonnen-Press

Die eingesetzte 15 Tonnen-Pressen ist eine mechanische Presse mit einem hydraulischen Dämpfungskissen und geeignet für das Pressen mit konstantem Druck (Hersteller *Komage*, Type K15). Der Pressentisch ist in der Abbildung 6.1 gezeigt.

Die ursprüngliche Versuchsplanung sah vor, in einer Reihe mit abgestuften Pressdrücken, beginnend bei möglichst kleinen Drücken, einige Prüflinge zu erzeugen, um ein Verhältnis Verdichtung zur aufgewendeten Kraft feststellen zu können. Bei der Versuchsdurchführung wurde eine untere Schranke des Pressdruckes festgestellt, bei dem die Verdichtung zu gering war, um haltbare Prüflinge zu erzeugen. So sind einige Prüflinge bereits bei der Entnahme aus der Form zerbrochen, andere haben den Transport zu den weiteren Untersuchungen nicht

überstanden. In diesem Zusammenhang wird auf die eingangs erwähnte Grünfestigkeit als Materialeigenschaft verwiesen.

Ein weiteres Problem ist die geringe Genauigkeit der Anzeige der verwendeten Presse und eine daraus resultierende Unsicherheit beim Ablesen der Messwerte. Das ist bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt.

Die einzelnen Proben sind durch eine laufende Nummer und die Presskraft gekennzeichnet.

6.1.2 1. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 1

Das Stampfpulver Nr. 1⁶ ist ein Eisenpulver. Um zufällige Ergebnisse auszuschließen, wurden pro Einstellung die Pressversuche bis zu zwanzig Mal wiederholt. In der nachstehenden Tabelle 6.1 sind die ermittelten Messergebnisse zusammengefasst.

Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, wurde bei diesen Messungen auch das Gewicht einzelner Proben erfasst. Als kleinstes Probengewicht wurde 5,29 Gramm als höchstes 5,47 Gramm festgestellt. Die festgestellte Streuung der Werte ist plausibel. Die Korngröße des Pulvers wird durch mehrmaliges Sieben beschränkt. Dabei kann der Feinanteil und damit die Dichte von Füllung zu Füllung durchaus differieren. Bildet man den Mittelwert über alle Proben, ergibt sich ein mittleres Gewicht von 5,39 Gramm, der für die weiteren Betrachtungen zugrunde gelegt wird.

Eingangs wurde der Umformungsgrad (Gl. 1.13, Gl. 1.14) und die prozentuelle Formänderung (Gl. 1.15) definiert. Mit den Messergebnissen unter Verwendung der gemittelten Messwerte der einzelnen Messfolgen ergeben sich folgende Wertepaare:

$$\varphi_{h(0,5t)} = -0,497, \varepsilon_{h(0,5t)} = -39,20 \%$$

$$\varphi_{h(0,9t)} = -0,600, \varepsilon_{h(0,9t)} = -45,17 \%$$

$$\varphi_{h(1,4t)} = -0,752, \varepsilon_{h(1,4t)} = -52,84 \%$$

⁶ Die Bezeichnungen der untersuchten Pulver sind interne Firmenbezeichnungen.

Messung	0,5 [t]	Gewicht [g]	0,9 [t]	Gewicht [g]	1,4 [t]	Gewicht [g]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	26,19	5,41	23,72		20,04	5,400
2	26,14	5,37	24,12		20,43	5,383
3	26,19	5,36	23,60	5,382	20,13	5,433
4	26,18	5,35	23,41		20,32	5,414
5	26,20	5,46	23,26	5,411	20,12	5,465
6			23,29	5,451	20,17	5,353
7			23,51		20,59	5,416
8			23,92	5,370	20,24	5,405
9			23,59	5,319	20,40	5,390
10			23,94	5,287	20,12	5,406
11			23,36	5,406	20,48	5,353
12			23,93	5,403	20,44	5,423
13			23,34	5,387	20,23	5,396
14			23,63		20,40	5,391
15			23,94	5,433	20,26	5,375
16			23,35	5,400	20,30	5,381
17			23,60		20,14	5,355
18			23,37	5,327	20,12	5,425
19					20,51	5,421
20					20,22	5,418

Tab. 6.1: Messergebnisse Stampfpulver Nr. 1

Für die spezifische Dichte von α -Eisen entnimmt man aus einer Tabelle einen Wert von $\rho = 7,83 \cdot 10^3$ [kg/m³] [Wal94]. Vergleicht man die theoretische Dichte der hergestellten Presslinge, mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht ermittelten Werten von $\rho_{(0,5t)} = 3,83 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(0,9t)} = 4,25 \cdot 10^3$ [kg/m³] und $\rho_{(1,4t)} = 4,94 \cdot 10^3$ [kg/m³], stellt man trotz der hohen Pressdrücke erhebliche Unterschiede zum homogenen Material fest.

Alle Pressendrucke, auch die bei den späteren Messungen abgelesenen, sind in der Tabelle 6.2 in die spezifische Gewichtskraft unter Verwendung der Norm-Schwerebeschleunigung umgerechnet.

Pressdruck [t] Ablesung	spez. Gewichtskraft [N/m ²]
0,5	0,9118
0,6	1,0942
0,7	1,2765
0,9	1,6413
0,95	1,7325
1,1	2,0060
1,2	2,1884
1,4	2,5532

Tab. 6.2: spezifische Gewichtskraft

6.1.3 2. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 3

Das Stampfpulver Nr. 3 ist ein Kupferpulver. Auch bei diesem Pulver wurden pro Einstellung die Versuche einige Male wiederholt. Elektrolyt-Kupferpulver ist in der Regel dendritisch. In der nachfolgenden Abbildung 6.2 werden stark vergrößerte elektronenmikroskopische Aufnahmen unterschiedlicher Kupferpulver gezeigt.

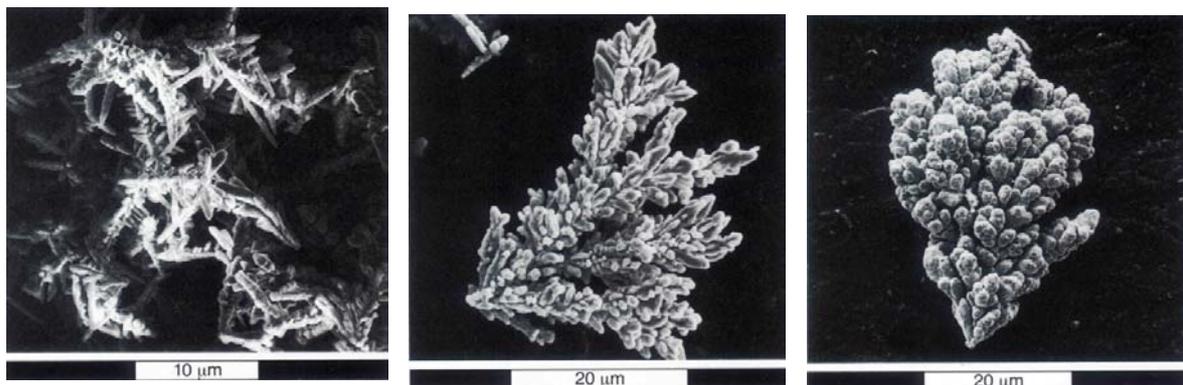


Abb. 6.2: Kornformen von dendritischen Elektrolyt-Kupferpulvern

Die Aufnahme im linken Teilbild zeigt ein Korn eines extrem dendritischen Pulvers, im mittleren und rechten Teilbild sind Körner von weniger dendritischen Pulvern gezeigt. Unmittelbar einleuchtend sind auf Grund der Kornformen das unterschiedliche Fließverhalten und die Grünfestigkeit dieser Pulver. Verwendet werden dendritische Pulver. Erwartet wird auf Grund der Kornformen eine hohe Verpressbarkeit. Ergänzend sind im Anhang A weitere Materialeigenschaften der untersuchten Stampfpulver zusammengestellt.

In der nachstehenden Tabelle 6.3 sind die ermittelten Messergebnisse der Pressversuche des Kupferpulvers zusammengefasst.

Messung	0,6 [t]	0,7 [t]	0,95[t] ⁷	1,4 [t]
	Höhe [mm]	Höhe [mm]	Höhe [mm]	Höhe [mm]
1	18,82	18,32	17,34	15,87
2	19,98	19,67	17,40	15,86
3	19,43	19,50	17,29	15,83
4	19,97	19,30	17,29	15,78
5	19,96	18,40	17,31	15,81
6	20,02	18,25	17,20	15,68
7	18,80	18,64	17,26	15,88
8	18,81		17,26	15,8
9	20,00		17,32	15,9
10			17,16	15,85
11			17,25	15,76
12			17,41	15,95
13			17,17	15,77
14			17,31	15,93
15			17,31	15,89
16			17,28	15,77
17			17,32	15,91
18			17,26	15,89
19			17,26	15,85

Tab. 6.3: Messergebnisse Stampfpulver Nr. 3

Danach wurden die Presslinge gewogen. Die ermittelten Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.4 zusammengefasst. Jene Presslinge, die mit einem Pressdruck in der Höhe von 0,6 Tonnen verpresst worden sind, waren auf Grund ihrer geringen Grünfestigkeit nicht für die Gewichtsermittlung und damit auch nicht für die weiteren Auswertungen geeignet.

Obwohl bei den vorhergegangenen Messungen der Probengewichte nur eine als geringfügig festzustellende Streuung der Einzelmessungen festgestellt worden ist, wurde die gesamte Anzahl der zur Verfügung stehenden (verbleibenden) Proben genutzt. Der dabei festgestellte Mittelwert und für weitere Berechnungen verwendete Wert ergibt 5,74 Gramm.

Die spezifische Dichte von Kupfer liegt bei $\rho = 8,93 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ [Wal94]. Vergleicht man die theoretische Dichte der hergestellten Presslinge, mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht ermittelten Werten von

⁷ Ablesbar waren die Werte 0,9 bzw. 1,0. Deshalb wurde der Mittelwert zugrunde gelegt.

$\rho_{(0,7t)} = 5,727 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, $\rho_{(0,95t)} = 6,141 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ und $\rho_{(1,4t)} = 6,750 \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, stellt man eine höhere Verpressung als beim Eisenpulver fest. Dieser Umstand lässt sich auch aus den Werten für den Umformungsgrad und der prozentuellen Formänderung ablesen.

$$\varphi_{h(0,6t)} = -0,789, \varepsilon_{h(0,6t)} = -54,58 \%$$

$$\varphi_{h(0,7t)} = -0,824, \varepsilon_{h(0,7t)} = -56,11 \%$$

$$\varphi_{h(0,95t)} = -0,911, \varepsilon_{h(0,95t)} = -59,80 \%$$

$$\varphi_{h(1,4t)} = -0,998, \varepsilon_{h(1,4t)} = -63,16 \%$$

Messung	0,6 [t]	0,7 [t]	0,95[t]	1,4 [t]
	Gewicht [g]	Gewicht [g]	Gewicht [g]	Gewicht [g]
1		5,733	5,703	5,731
2		5,979	5,694	5,704
3		5,908	5,768	5,706
4		5,948	5,704	5,735
5		5,702	5,720	5,739
6		5,696	5,724	5,758
7		5,710	5,655	5,756
8			5,672	5,757
9			5,735	5,828
10			5,711	5,755
11			5,729	5,779
12			5,783	5,725
13			5,673	5,741
14			5,683	5,708
15			5,683	5,769
16			5,700	5,761
17			5,688	5,733
18			5,725	5,782
19			5,702	5,781

Tab. 6.4: Messergebnisse Gewichte der Proben Stampfpulver Nr. 3

6.1.4 3. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 6

Das Stampfpulver Nr. 6 ist ein galvanisch versilbertes Kupferpulver. Wie zuvor wurden auch bei diesem Pulver pro Einstellung die Versuche einige Male wiederholt. In der nachstehenden Tabelle 6.5 sind die ermittelten Messergebnisse zusammengefasst.

Messung	0,6 [t]	0,7 [t]	0,95 [t]	1,1 [t]	1,2 [t]	1,4 [t]
	Höhe [mm]					
1	18,40	18,43	16,22	16,28	16,33	15,32
2	18,43	18,44	16,24	16,26	16,35	15,24
3	18,43	18,44	16,19	16,61	15,70	15,34
4	18,40	18,54	16,40	16,60	15,55	15,20
5	18,43	18,45	16,25		15,28	15,31
6	18,68	17,68	16,25			15,32
7	18,42	18,46	16,25			15,23
8	18,43	18,45	16,22			15,33
9	19,02	18,73	16,23			15,34
10	18,45	18,45	16,27			15,40
11	18,42	18,42	16,24			15,31
12	19,00	17,98	16,24			15,30
13	18,41	18,71	16,36			15,35
14	18,42		16,42			15,25
15	18,43		16,24			15,30
16	18,40		16,26			15,37
17	18,43		16,42			15,21
18	18,41		16,27			15,30
19	18,43		16,20			15,22
20	18,41		16,25			15,21

Tab. 6.5: Messergebnisse Stampfpulver Nr. 6

Der mittels der Gesamtanzahl gemessener Probengewichte festgestellte Mittelwert ergibt 5,511 Gramm und wird für die weiteren Auswertungen verwendet. Die zugrunde gelegten Ergebnisse der Messungen sind in der weiter unten gezeigten Tabelle 6.6 dargestellt.

Messung	0,6 [t]	0,7 [t]	0,95 [t]	1,1 [t]	1,2 [t]	1,4 [t]
	Gewicht [g]					
1	5,471	5,553	5,411	5,763	5,795	5,446
2	5,484	5,526	5,412	5,662	5,706	5,540
3	5,577	5,649	5,248	5,590	5,583	5,528
4	5,394	5,569	5,484	5,655	5,386	5,429
5	5,544	5,613	5,571		5,324	5,445
6	5,497	5,569	5,557			5,420
7	5,530	5,610	5,628			5,525
8	5,466	5,607	5,312			5,501
9	5,559	5,702	5,464			5,529
10	5,519	5,773	5,583			5,468
11	5,477	5,505	5,461			5,421
12	5,508	5,445	5,415			5,404
13	5,432	5,655	5,544			5,550
14	5,600		5,527			5,514
15			5,543			5,380
16	5,420		5,464			5,507
17	5,439		5,533			5,473
18	5,446		5,553			5,424
19	5,466		5,246			5,505
20	5,440		5,475			5,463

Tab. 6.6: Messergebnisse Gewichte der Proben Stampfpulver Nr. 6

Die spezifische Dichte von Kupfer ist bereits bekannt, zusammen mit dem prozentuell geringen Anteil Silber (durchschnittlich $4 \pm 0,5$ %, mit $\rho = 10,2 \cdot 10^3$ [kg/m³] [Wal94]) wurde für die durchschnittliche Gesamtdichte des Pulvers ein Wert von $\rho = 8,99 \cdot 10^3$ [kg/m³] ermittelt und in den weiteren Berechnungen verwendet. Auf Grund des geringen Unterschiedes und des prozentuell geringen Anteils des Silbers an der Zusammensetzung sind diese Unterschiede vernachlässigbar, die durch die Mischung unterschiedlicher Korngrößen denkbar sind. Vergleicht man die theoretische Dichte der hergestellten Presslinge, mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht ermittelten Werten von $\rho_{(0,6t)} = 5,557 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(0,7t)} = 5,694 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(0,95t)} = 6,296 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(1,1t)} = 6,455 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(1,2t)} = 6,569 \cdot 10^3$ [kg/m³] und $\rho_{(1,4t)} = 6,701 \cdot 10^3$ [kg/m³], stellt man eine weiter gesteigerte Verdichtung gegenüber dem reinem Kupferpulver fest. Die zugehörigen Kennwerte für den Umformungsgrad und die prozentuellen Formänderung lauten:

$$\begin{aligned}\varphi_{h(0,6t)} &= -0,844, \varepsilon_{h(0,6t)} = -56,99 \% \\ \varphi_{h(0,7t)} &= -0,849, \varepsilon_{h(0,7t)} = -57,21 \% \\ \varphi_{h(0,95t)} &= -0,971, \varepsilon_{h(0,95t)} = -62,16 \% \\ \varphi_{h(1,1t)} &= -0,962, \varepsilon_{h(1,1t)} = -61,77 \% \\ \varphi_{h(1,2t)} &= -0,998, \varepsilon_{h(1,2t)} = -63,16 \% \\ \varphi_{h(1,4t)} &= -1,034, \varepsilon_{h(1,4t)} = -64,44 \%\end{aligned}$$

6.1.5 WEITERE UNTERSUCHUNGEN

Weiters sollen einige definierte Presslinge, die mit unterschiedlichen Pressdrücken erzeugt worden sind, durchgebrochen werden, um deren Bruchflächen mit Hilfe eines Elektronen-Mikroskops untersuchen zu können.

Ein festgestellter Teilaspekt der vorhergehenden Untersuchungen ist die Inhomogenität der erzeugten Proben. Um die daraus zu erwartenden Ungenauigkeiten bei den Auswertungen zu minimieren, werden Möglichkeiten zur Umgestaltung der Versuche untersucht. Erschwerend dabei ist, dass nur jene Versuche tatsächlich durchgeführt werden können, für die entweder die Ausrüstung zur Versuchsdurchführung bereits vorhanden ist oder mit einfachen kostengünstigen Adaptionen bereitgestellt werden kann.

6.1.6 ZUSÄTZLICHE VERSUCHSIDEEN

Eine Versuchsidee ist, die Presshöhe stark zu reduzieren. Beim Stampfvorgang liegen die einzelnen Schichtdicken in einer Größenordnung von 0,5 bis 1 mm. Ein nicht unwesentliches Problem wird es allerdings dann sein, sinnvolle Messreihen mit den so erzeugten Plättchen festzulegen.

Eine weitere Versuchsreihe könnte, vergleichbar mit dem Stampfvorgang, die zu verpressende Pulvermenge portioniert zuführen. In der Versuchsdurchführung soll eine durchschnittliche Pulvermenge in mehrere, etwa gleich große Teilmengen portioniert werden und entsprechend der Anzahl dieser Teilmengen die Matrize mehrmals gefüllt und mit dem gleichen Druck nacheinander verpresst werden, solange, bis die vorbereitete Pulvermenge aufgebraucht ist. Obwohl eine derartige Versuchsdurchführung nicht direkt mit dem vergleichsweise schlagartigen Verdichten beim Stampfvorgang in Relation gesetzt werden kann, ein Pressenhub dauert dabei etwa drei Sekunden, wären Rückschlüsse auf die Haltbarkeit speziell der Trennschichten zwischen den einzelnen Teilfüllungen denkbar. Diese Vorge-

hensweise ist jedoch mit der für die erste Versuchsreihe verwendeten Presse nicht durchführbar, weil diese Presse nur abhängig vom zurückgelegten Pressweg gesteuert werden kann.

Realisiert werden konnte eine Versuchsreihe, bei der Presslinge mit einer geringeren Höhe erzeugt worden sind. Zweck der Versuche war es, Erkenntnisse über die Eigenschaften der Stirnfläche der Proben zu gewinnen, also jenen Bereich der Verpressung, wo bei der schlagenden Bewegung das Stampfrohr auf das Pulver auftrifft.

6.1.7 PROBENHERSTELLUNG FÜR DIE ZWEITE VERSUCHSREIHE

Auch bei dieser Presse, einer mechanisch hydraulischen 20 Tonnen-Pressen des Herstellers *Komage* (Type KFMA 20) wurde ein vorhandenes Gesenk⁸ mit etwas geringeren Abmessungen (6,10 x 7,77 x 11 mm) verwendet. Die folgende Abbildung 6.3 zeigt die Presse mit geöffneten Schutztüren.



Abb. 6.3: 20 Tonnen-Pressen

⁸ Gesenk Nr. 2260 mit den Abmessungen 6,10 x 7,77 x (11) mm. Das vorher verwendete Gesenk war bei dieser Presse nicht verwendbar.

Bei den Versuchen wurde jeweils das Gesenk mit dem zu prüfenden Stampfpulver vollständig gefüllt, die Oberfläche mit einem Lineal glattgestrichen und danach der Pressvorgang durchgeführt. In der Abbildung 6.4 ist der Einformvorgang dargestellt, der genauso wie bei der ersten Probenherstellung erfolgte.



Abb. 6.4: Pulver in die Matrize einformen

Abb. 6.4 zeigt das Glattstreichen der Pulverfüllung. Der Arbeitsaufwand ist zur Herstellung der Prüflinge relativ zeitaufwendig. Das Gesenk muss händisch gefüllt werden, die Oberfläche abgestrichen und der Pressvorgang danach mit der Sicherheitsschaltung ausgelöst werden.

Zur Entnahme der Prüflinge konnte bei der verwendeten Presse auch der Unterstempel bewegt werden. Die daraus resultierende zusätzliche Belastung der Prüflinge durch das Reiben der verpressten Körner entlang der Matrizenwand beim Ausstoßen der Probe war messtechnisch nicht erfassbar. In der Abbildung 6.5 ist der Ausformvorgang gezeigt. Die entnommenen Proben sind danach auf der Unterstempelseite beschriftet worden.



Abb. 6.5: Ausstoßen des Prüflings

Auch bei dieser Versuchsplanung wurden abgestuften Pressdrücke verwendet.

Diese Presse besitzt eine Anzeige- und Bedieneinheit, wodurch das Ablesen der digital angezeigten Messwerte einfach war. In der Abbildung 6.6 ist diese Bedieneinheit mit dem Monitor zum Ablesen der Werte gezeigt



Abb. 6.6: Bedienung der Presse und Ablesen der Werte

Auch hier wurden mehrere Proben pro Druck und Pulver hergestellt, um die erwartete Streuung der Ergebnisse abschätzen zu können. In den folgenden Messreihen sind die einzelnen Proben durch eine laufende Nummer und die Presskraft gekennzeichnet.

6.1.8 4. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 1

Wie bereits bei den vorher erzeugten Proben werden auch die weiteren Prüflinge mit ähnlichen Pressdrücken erzeugt. In Tabelle 6.7 sind die ermittelten Werte für die Probenhöhen und deren Gewichte zusammengestellt.

Messung	0,5 [t]	Gewicht [g]	1,0 [t]	Gewicht [g]	1,5 [t]	Gewicht [g]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	3,38	0,782	2,89	0,755	2,72	0,762
2	3,36	0,763	2,89	0,759	2,72	0,766
3	3,40	0,766	2,85	0,765	2,77	0,775
4	3,35	0,764	2,93	0,768	2,74	0,769
5	3,36	0,762	2,91	0,767	2,75	0,768
6	3,38	0,766	2,89	0,757	2,72	0,768
7	3,39	0,776	2,87	0,748	2,74	0,762
8	3,38	0,775	2,90	0,761	2,73	0,767
9	3,38	0,757	2,90	0,760	2,75	0,784
10	3,38	0,760	2,91	0,766	2,76	0,766
11	3,39	0,768	2,91	0,754	2,79	0,787
12	3,39	0,751	2,89	0,750	2,75	0,774
13	3,37	0,755	2,90	0,767	2,72	0,775
14	3,40	0,769	2,91	0,754	2,75	0,766
15	3,38	0,764	2,90	0,749	2,76	0,787
16	3,38	0,766	2,92	0,766	2,75	0,770
17	3,31	0,764	2,93	0,762	2,74	0,768
18	3,35	0,756	2,93	0,768	2,76	0,776
19	3,38	0,758	2,91	0,769	2,71	0,762
20	3,40	0,777	2,89	0,751	2,75	0,766
21	3,40	0,777	2,90	0,772	2,76	0,766
MIN	3,31	0,751	2,85	0,748	2,71	0,762
MAX	3,40	0,782	2,93	0,772	2,79	0,787
MITTEL	3,38	0,766	2,90	0,760	2,74	0,771

Tab. 6.7: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 1

Die Abmessungen der Grundfläche des hier verwendeten Gesenks sind in einer ähnlichen Größenordnung. Wie vorher wurde die Dichte mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht der gemessenen Werte ermittelt. Man errechnet die Werte von $\rho_{(0,5t)} = 4,78 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(1,0t)} = 5,53 \cdot 10^3$ [kg/m³] und $\rho_{(1,5t)} = 5,94 \cdot 10^3$ [kg/m³] ermittelt.

Diese Werte werden in der Abbildung 6.7 den vorher ermittelten Werten für das Eisenpulver gegenübergestellt.

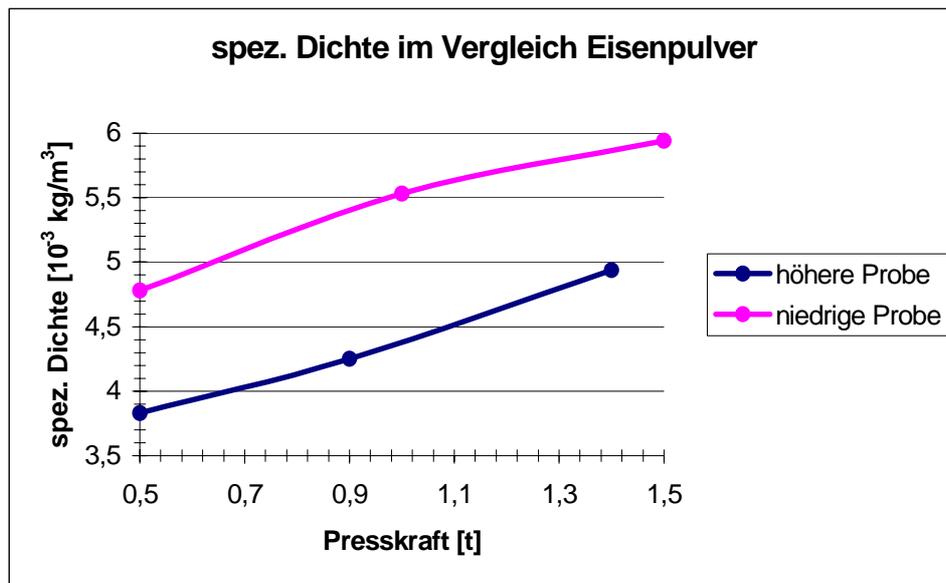


Abb. 6.7: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 1

Abb. 6.7 zeigt den Einfluss der Probenhöhe auf die spezifische Dichte. Die Dichte des Körpers mit der geringeren Pulvermenge ist bei gleichem Herstellungsdruck deutlich höher. Dieser Umstand wird durch die Wertepaare (Umformungsgrad und prozentuelle Formänderung) bestätigt, die deutlich höher als beim vorhegenden Versuch festgestellt worden ist. Die ermittelten Werte lauten:

$$\varphi_{h(0,5t)} = -1,180, \varepsilon_{h(0,5t)} = -69,27 \%$$

$$\varphi_{h(1,0t)} = -1,333, \varepsilon_{h(1,0t)} = -73,64 \%$$

$$\varphi_{h(1,5t)} = -1,389, \varepsilon_{h(1,5t)} = -75,09 \%$$

Diese Messwerte bestätigen das vorgestellte Modell des Verdichtungsvorganges.

6.1.9 5. MESSREIHE: STAMPFPULVER NR. 3

Die oben gewählte Vorgehensweise wird bei diesem Versuch auf das Kupferpulver angewendet. In Tabelle 6.8 sind die ermittelten Werte für die Probenhöhen und deren Gewichte zusammengestellt.

Messung	0,5 [t]	Gewicht [g]	0,9 [t]	Gewicht [g]	1,5 [t]	Gewicht [g]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	2,73	0,860	2,45	0,851	2,39	0,874
2	2,72	0,870	2,47	0,860	2,40	0,882
3	2,72	0,872	2,47	0,865	2,41	0,879
4	2,76	0,886	2,45	0,850	2,43	0,884
5	2,74	0,880	2,46	0,856	2,41	0,883
6	2,74	0,877	2,45	0,844	2,41	0,877
7	2,73	0,874	2,48	0,869	2,39	0,869
8	2,73	0,876	2,43	0,840	2,40	0,879
9	2,72	0,864	2,47	0,858	2,40	0,869
10	2,73	0,873	2,45	0,850	2,41	0,879
11	2,75	0,878	2,47	0,860	2,39	0,872
12	2,73	0,872	2,48	0,864	2,40	0,880
13	2,73	0,868	2,48	0,868	2,40	0,874
14	2,73	0,873	2,45	0,853	2,40	0,882
15	2,72	0,870	2,45	0,852	2,41	0,881
16	2,74	0,877	2,48	0,861	2,42	0,889
17	2,69	0,873	2,47	0,859	2,40	0,871
18	2,73	0,870	2,46	0,855	2,42	0,893
19	2,75	0,891	2,43	0,839	2,41	0,886
20	2,72	0,864	2,45	0,850	2,41	0,889
21	2,75	0,881	2,52	0,854	2,40	0,876
MIN	2,69	0,09	2,43	0,839	2,390	0,869
MAX	2,76	0,89	2,52	0,869	2,430	0,893
MITTEL	2,73	0,84	2,46	0,855	2,405	0,879

Tab. 6.8: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3

Wie vorher wurde die Dichte mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht der gemessenen Werte ermittelt. Man errechnet die Werte von $\rho_{(0,5t)} = 6,49 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(1,0t)} = 6,68 \cdot 10^3$ [kg/m³] und $\rho_{(1,5t)} = 7,02 \cdot 10^3$ [kg/m³] ermittelt.

Diese Werte werden in der Abbildung 6.8 den vorher ermittelten Werten für das Kupferpulver gegenübergestellt.

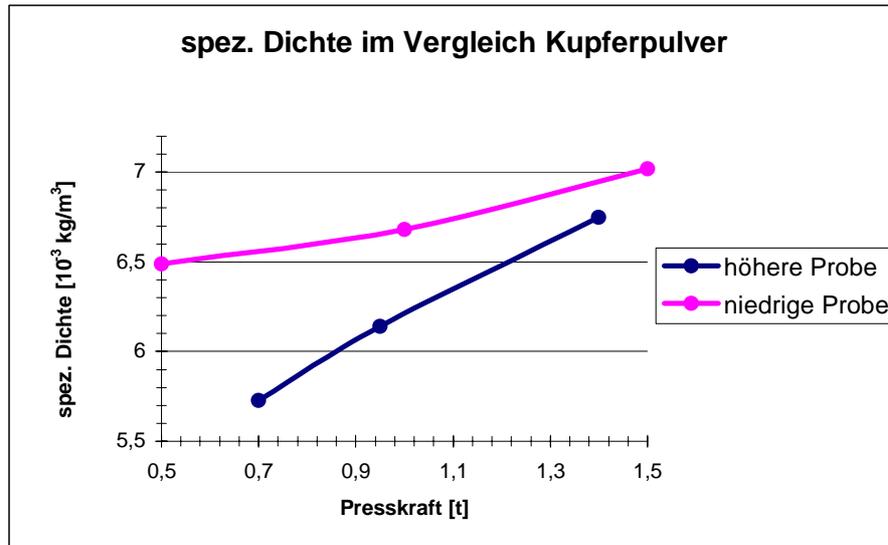


Abb. 6.8: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3

Der Einfluss der Probenhöhe auf die spezifische Dichte wird auch beim Kupferpulver bestätigt (Abb. 6.8). Die ermittelten Werte für Umformungsgrad und prozentuelle Formänderung lauten:

$$\varphi_{h(0,5t)} = -1,393, \varepsilon_{h(0,5t)} = -75,18 \%$$

$$\varphi_{h(1,0t)} = -1,500, \varepsilon_{h(1,0t)} = -77,63 \%$$

$$\varphi_{h(1,5t)} = -1,520, \varepsilon_{h(1,5t)} = -78,13 \%$$

Auch diese Messwerte bestätigen das vorgestellte Modell des Verdichtungsprozesses.

6.1.10 6. Messreihe: Stampfpulver Nr. 6

Die bekannte Vorgehensweise wird bei diesem Versuch auf das versilberte Kupferpulver angewendet. In Tabelle 6.9 sind die ermittelten Werte für die Probenhöhen und deren Gewichte gezeigt.

Messung	0,5 [t]	Gewicht [g]	0,9 [t]	Gewicht [g]	1,5 [t]	Gewicht [g]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	2,50	0,806	2,19	0,764	2,12	0,782
2	2,50	0,799	2,25	0,774	2,13	0,782
3	2,47	0,772	2,25	0,783	2,09	0,769
4	2,45	0,771	2,24	0,787	2,11	0,767
5	2,49	0,798	2,26	0,790	2,13	0,784
6	2,48	0,782	2,25	0,780	2,12	0,776
7	2,47	0,785	2,27	0,798	2,14	0,790
8	2,42	0,780	2,28	0,798	2,14	0,788
9	2,50	0,801	2,22	0,779	2,13	0,787
10	2,47	0,775	2,28	0,797	2,11	0,776
11	2,49	0,797	2,28	0,782	2,09	0,771
12	2,50	0,805	2,24	0,784	2,15	0,788
13	2,50	0,800	2,22	0,773	2,13	0,784
14	2,49	0,788	2,24	0,777	2,10	0,767
15	2,48	0,778	2,28	0,797	2,10	0,767
16	2,48	0,790	2,22	0,781	2,10	0,771
17	2,48	0,776	2,21	0,776	2,12	0,775
18	2,48	0,779	2,18	0,773	2,13	0,787
19	2,47	0,782	2,23	0,778	2,14	0,787
20	2,51	0,800	2,25	0,782	2,10	0,765
21	2,50	0,786	2,27	0,792	2,14	0,788
MIN	2,420	0,771	2,180	0,764	2,090	0,765
MAX	2,510	0,806	2,280	0,798	2,150	0,790
MITTEL	2,482	0,788	2,243	0,783	2,120	0,779

Tab. 6.9: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6

Auch hier wurde die Dichte mit den aus dem gegebenen Volumen und durchschnittlichem Gewicht der gemessenen Werte ermittelt. Man errechnet die Werte von $\rho_{(0,5t)} = 6,69 \cdot 10^3$ [kg/m³], $\rho_{(1,0t)} = 7,37 \cdot 10^3$ [kg/m³] und $\rho_{(1,5t)} = 7,75 \cdot 10^3$ [kg/m³] ermittelt.

Diese Werte werden in der Abbildung 6.8 den vorher ermittelten Werten für das Kupferpulver gegenübergestellt.

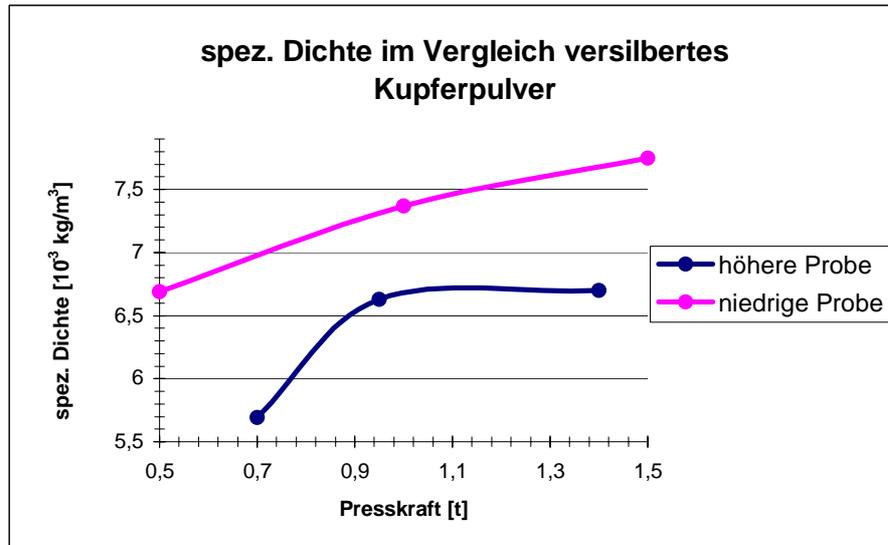


Abb. 6.9: Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6

Der Einfluss der Probenhöhe auf die spezifische Dichte wird auch beim versilberten Kupferpulver bestätigt (Abb. 6.9). Interessant dabei ist, dass der Anstieg der Kurve "höhere Probe" zunächst sehr steil ist, im Bereich der Presskraft um 0,95 t eine Richtungsänderung erfährt und dann flacher wird. Der bei diesen Messungen festgestellte Knick könnte auch durch die bei der Probenherstellung festgehaltene geringe Genauigkeit der Anzeige mit verursacht worden sein.

Die ermittelten Werte für Umformungsgrad und prozentuelle Formänderung lauten:

$$\varphi_{h(0,5t)} = -1,489, \varepsilon_{h(0,5t)} = -77,44 \%$$

$$\varphi_{h(1,0t)} = -1,590, \varepsilon_{h(1,0t)} = -79,61 \%$$

$$\varphi_{h(1,5t)} = -1,642, \varepsilon_{h(1,5t)} = -80,72 \%$$

Wie erwartet, bestätigen auch diese Messwerte das vorgestellte Modell des Verdichtungsvorganges.

6.1.11 ERSTES ZWISCHENERGEBNIS

Die beschriebenen Versuchsreihen haben unterschiedliche Ergebnisse gezeigt. Zunächst liegt das Hauptinteresse der folgenden Betrachtungen bei den Proben der ersten Versuchsreihe, die oben als "höhere Proben" bezeichnet worden sind und danach werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe zusammengefasst.

ERSTE VERSUCHSREIHE

In der nachfolgenden Abbildung 6.10 werden einige der erzeugten Prüflinge der ersten Versuchsreihe gezeigt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Verpressung in der Wirkungsrichtung des Druckaufbaues in den Probekörpern inhomogen ist.

Beim Pressvorgang, beispielsweise beim Pressen mit nur einem beweglichen Stempel in eine feststehende Matrize, wird die unterste Lage der Körner gar nicht, die oberste Lage der Pulverschicht am weitesten bewegt. Durch Reibung der Körner aneinander und gegen den Matrizenrand entstehen ungleichmäßige Druckverteilungen, die besonders gut bei der aus Eisenpulver erzeugten Probe zu sehen sind.



Abb. 6.10: Prüflinge, Verpressung mit 1,4 t. Linkes Teilbild: Eisenpulver (Pulver Nr.1), mittleres Teilbild: Kupferpulver (Pulver Nr. 3), rechtes Teilbild: versilbertes Kupferpulver (Pulver Nr.6)

Als erstes Zwischenergebnis ist festzustellen, dass sich das Stampfpulver Nr. 6 (galvanisch versilbertes Kupfer) offenbar im Vergleich der untersuchten Pulver am besten verpressen lässt.

Die unterschiedlichen Probengewichte lassen sich mit leicht differierenden Korngrößen der Pulver plausibel machen. Im realen Einsatz an der Maschine ist daher

mit differierenden Füllmengen auch auf Grund der Streuungen der Korngrößen zu rechnen.

In Abbildung 6.11 ist die prozentuelle Verpressung der verwendeten Pulver dargestellt. Interessant ist, dass sich im untersuchten Bereich eine annähernd lineare prozentuelle Verpressung ergibt.

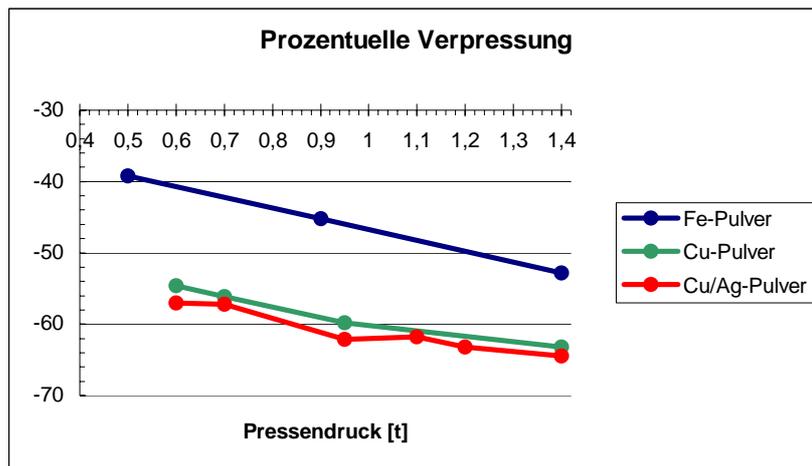


Abb. 6.11: Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver

ZWEITE VERSUCHSREIHE

Ähnlich wie vorher ist in Abbildung 6.12 die prozentuelle Verpressung der verwendeten Pulver dargestellt. Auch hier zeigt sich im untersuchten Bereich eine annähernd lineare prozentuelle Verpressung ergibt.

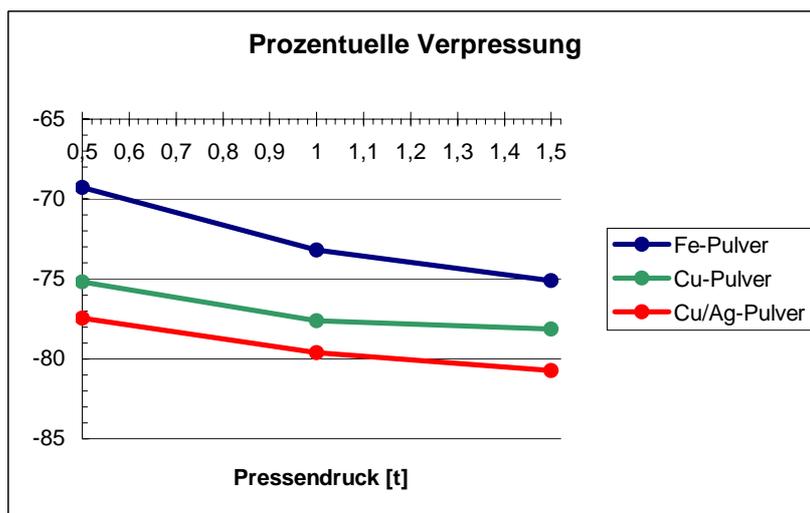


Abb. 6.12: Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver

In Abbildung 6.13. ist die Idee gezeigt, die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe linear in Richtung höherer Presskraft zu interpolieren.

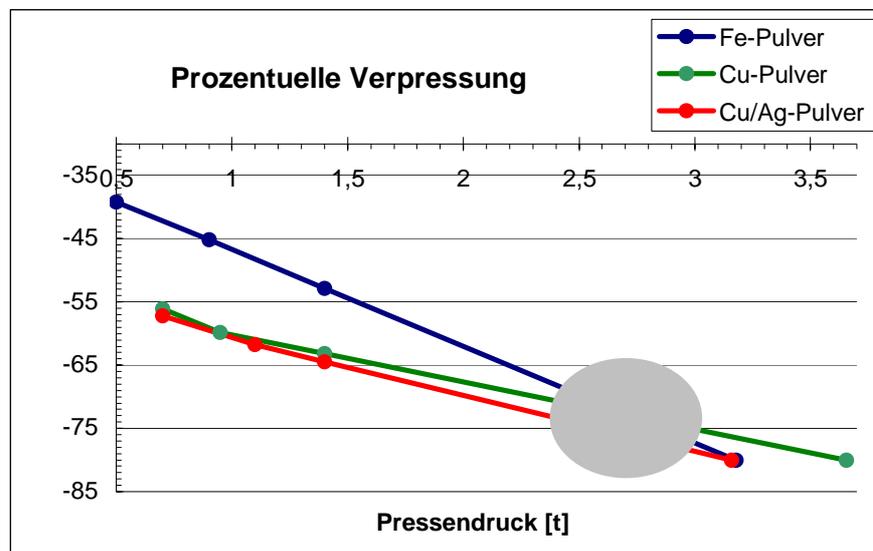


Abb. 6.13: Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver Messreihe 1, linear interpoliert

Abbildung 6.13 zeigt, dass wenn die in Messreihe 2 gefundene prozentuelle Verpressung erreicht werden soll etwa doppelt so hohe Drücke bei der Probenherstellung aufzuwenden gewesen wären. Da angenommen werden darf, dass kein linearer Zusammenhang besteht, kann sich der im Bild markierte Bereich verschieben.

Aus der Tendenz der erhöhten Verpressung bei kleineren Presshöhen lässt sich folgern, dass hohe Verpressungen von Stampfpulvern auch bei geringer Schlagenergie erreicht werden können, wenn die Pulvermenge pro Schlag entsprechend reduziert wird.

6.2 MESSUNGEN DER ELEKTRISCHEN EIGENSCHAFTEN

Die Messung des Übergangswiderstandes ist eine zerstörungsfreie Prüfung. Diese Prüfung wird normalerweise an Stichproben vorgenommen. Es existieren jedoch auch Automaten, bei denen jede Kohle geprüft wird. Optional werden bei einigen Maschinen auch Ergebnisse dieser Prüfung automatisch protokolliert.

6.2.1 DAS MESSPRINZIP

Mit Hilfe einer Stromquelle wird ein konstanter Messstrom erzeugt und durch den Prüfling geleitet. An geeigneten Stellen wird mittels Messspitzen ein Spannungsabgriff vorgenommen. Die gemessene Spannung ist proportional zum Übergangswiderstand und kann in einer eigenen Vorrichtung direkt an der Maschine oder außerhalb der automatisierten Fertigung bestimmt werden.

Nachfolgend werden die Materialproben auf ihre Widerstandswerte untersucht. Der elektrische Widerstand von Werkstoffen kann durch den im Ohmschen Gesetz beschriebenen Zusammenhang zwischen Widerstand, Spannung und Strom einfach ermittelt werden. Es gilt die Beziehung

$$R = U_{\text{Mess}} / I \quad [\text{V/A} = \Omega] \quad (6.1)$$

mit der Messspannung U_{Mess} [V] und dem über die Probe fließenden Strom I [A]. Dabei wird der Strom konstant⁹ eingestellt, die dazu notwendige Spannung ist dann direkt proportional zum gesuchten Widerstand. Die Messanordnung ist in der nachstehenden Skizze gezeigt (Abb. 6.10). Das Prinzip der Messanordnung entspricht der Norm DIN IEC 467 [DIN221], der Messstrom wird jedoch unterschiedlich gewählt und ebenso wie der Messabgriff den Erfordernissen angepasst. Allgemein wird dieses Messverfahren als Voltmeter-Ampere-meter Verfahren bezeichnet.

⁹ Zur Erzeugung des Messstromes wurde eine Konstantstromquelle bzw. ein Kalibrator verwendet.

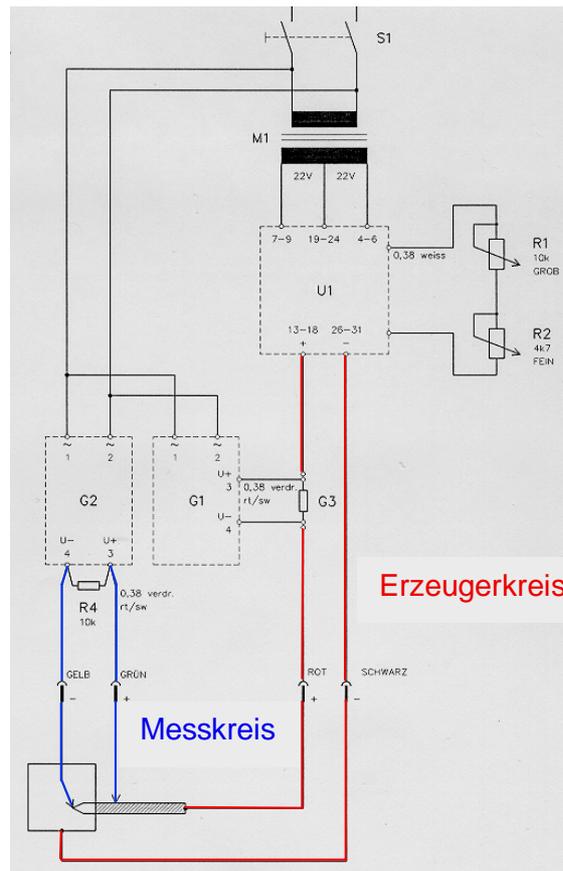


Abb. 6.14: Messprinzip Voltmeter-Amperemeter Verfahren (Zeichnungsausschnitt [eigen]).

In Abbildung 6.14 sind im Wesentlichen der Erzeugerkreis bestehend aus einer regelbaren Spannungsquelle (in dieser Darstellung eine einstellbare Konstantstromquelle, deren Strombegrenzung über die Potentiometer R1 und R2 verstellbar ist) mit in Reihe geschaltetem Amperemeter (digitales Millivoltmeter G1 mit Shunt G3) und dem Verbraucher (Prüfling) sowie dem Messabgriff bestehend aus Prüfspitzen und einem weiteren (Milli-) Voltmeter dargestellt.

Eine weitere Norm, die DIN IEC 413 [DIN221], beschäftigt sich mit Prüfverfahren zur Bestimmung der physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe von Kohlebürsten für elektrische Maschinen. Darunter wird zunächst der Grundwerkstoff einer Kohlebürste verstanden, nicht jedoch die Prüflinge wie sie hier vorliegen. Darin wird beispielsweise beschrieben, wie aus einem gepressten Block des Grundmaterials von Kohlebürsten die Proben zu entnehmen sind. Abgesehen von dem Umstand, dass unsere Prüflinge nicht als Grundmaterial im Sinne dieser Vorschrift betrachtet werden können, eine Probenentnahme auf Grund der geringen Abmessungen unserer Prüfkörper ebenfalls nicht möglich ist, sollen zumindest die anzuwendenden Messmethoden im Sinne dieser Vorschrift erfolgen.

Allgemein festgelegt sind die Temperatur des Messraumes, die Abmessungen des Probekörpers und die Handhabung der Messspitzen und eventuell zulässige Toleranzgrenzen. Die angegebene Formel (6.2) definiert den spezifischen Widerstand wie folgt:

$$\rho = \frac{\text{gemessener Spannungsabfall} \cdot \text{Höhe}_{(\text{Probe})} \cdot \text{Breite}_{(\text{Probe})}}{\text{gemessene Stromstärke} \cdot \text{Abstand}_{(\text{Messspitzen})}} \quad (6.2)$$

(vgl. [DIN221]). Die gemessenen Widerstände sind in Mikro-Ohm • Meter angegeben.

Die Vorrichtungen, in denen Proben für die Messung fixiert werden, sind an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst. Die Normen schreiben dazu keine besonderen Festlegungen vor, ausgenommen eine ausreichend gute Kontaktierung: „Die Andruckkraft der Meßspitzen soll so groß sein, daß der Zeiger des Millivoltmeters ruhig steht“ [DIN221]. In Abbildung 6.15 ist die verwendete Vorrichtung gezeigt. Sie besteht aus einer verschiebbaren, fixierbaren Elektrode und einer gefederten Elektrode für die Stromzuführung. Durch die Federkraft wird der Prüfling fixiert. Die Messspitzen sind auf einer Schiene fixiert, damit ein konstanter Abstand für den Abgriff der Messspannung sichergestellt ist. Im Bild ist einer der erzeugten Prüflinge eingespannt und zur Messung bereit. Der Abgriff der Messspannung soll genau axial auf der Mittellinie der Probe erfolgen.

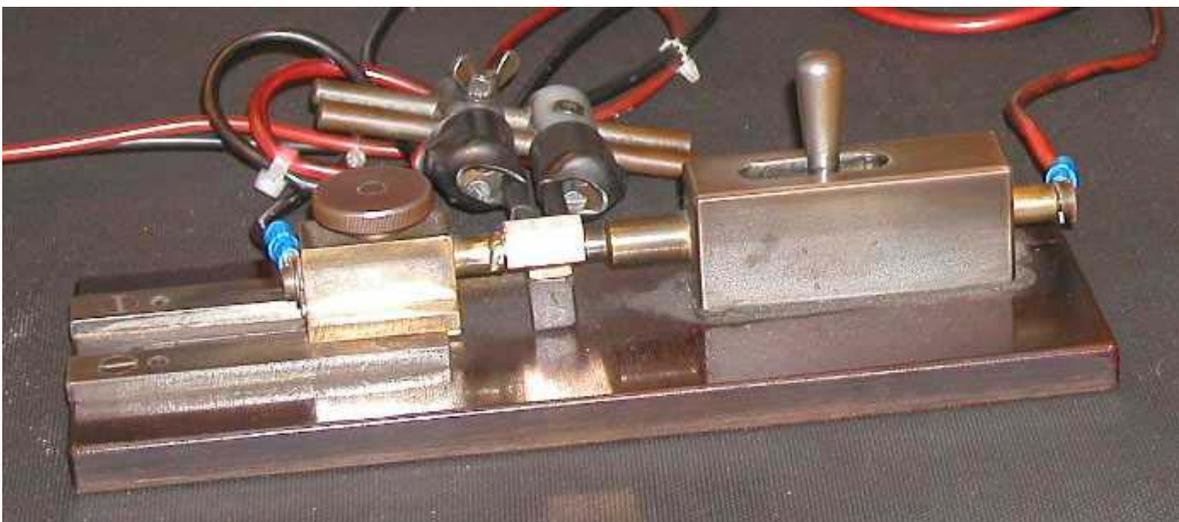


Abb. 6.15: Vorrichtung für Widerstandsmessung [Werkbild Schunk]

Aus der Menge der erzeugten Prüflinge wurden Stichproben ausgewählt und untersucht. Es ist bekannt, dass verpresste Pulver die Eigenschaft zeigen, sich nach der Entlastung wieder auszudehnen, also, dass eine wenn auch geringe Volumenvergrößerung nach einem Pressvorgang stattfindet. Nebenbei bemerkt

trägt auch dieser Umstand einerseits zur Ausreißfestigkeit eines Stampfkontaktes bei genauso wie andererseits, bei zu großer Volumenänderung, ein erzeugter Kontakt auch mechanisch zerstört werden könnte. Daher wurden die ausgewählten Proben bezüglich ihrer Höhe und Breite nachgemessen. Die mit Hilfe der Formel 6.2 ermittelten Werte sind in der nachfolgenden Tabelle 6.10 für das Eisenpulver und Tabelle 6.11 für die Kupferpulver zusammengefasst, wobei der Abstand der Messspitzen einheitlich auf 10 mm festgelegt worden ist.

Probe (Druck)	Material	Abmessungen $H [10^{-3} \text{ m}] \times T [10^{-3} \text{ m}]$	Spannung $U [10^{-3} \text{ V}]$	Strom $I [\text{ A}]$	spez. Widerstand $\rho [\mu\Omega \cdot \text{ m}]$
3 (0,5 t)	Fe	6,86x7,867	102,00	1	550,5
4 (0,5 t)	Fe	6,86x7,867	109,00	1	588,2
6 (0,9 t)	Fe	6,86x7,867	72,71	1	391,3
8 (0,9 t)	Fe	6,86x7,867	65,87	1	355,5
7 (1,4 t)	Fe	6,86x7,867	29,91	1	161,4
9 (1,4 t)	Fe	6,86x7,867	30,50	1	164,6
17 (1,4 t)	Fe	6,86x7,867	27,20	1	146,8

Tab. 6.10: Spezifischer Widerstand der Proben (Fe)

Probe (Druck)	Material	Abmessungen $H [10^{-3} \text{ m}] \times T [10^{-3} \text{ m}]$	Spannung $U [10^{-3} \text{ V}]$	Strom $I [\text{ A}]$	spez. Widerstand $\rho [\mu\Omega \cdot \text{ m}]$
2 (0,5 t)	Cu	6,867x7,871	12,58	5	13,60
3 (0,5 t)	Cu	6,867x7,871	7,40	5	8,00
14 (0,5 t)	Cu	6,867x7,871	17,11	5	18,50
2 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,27	5	0,29
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,25	5	0,27
5 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,24	5	0,26
10 (0,95t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,12	5	0,11
11 (0,95t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,14	5	0,13
14 (0,95t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,15	5	0,14
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,11	5	0,10
9 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,10	5	0,09
11 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	0,11	5	0,10

Tab. 6.11: Spezifischer Widerstand der Proben (Cu, Cu-Ag)

Die Aussagekraft unserer Messergebnisse ist unter Bedachtnahme auf die vorher festgestellten Inhomogenitäten der Proben zu bewerten. Dennoch ist zu erkennen, dass die ermittelten spezifischen Widerstandswerte bei den mit höheren

Drücken erzeugten Proben, wie erwartet, geringer sind als bei jenen mit niedrigeren Drücken hergestellten.

6.2.2 WEITERE MESSMETHODEN

Während die vorher beschriebene Messmethode genormt ist haben einige Abnehmer der Kohlebürsten eigene Prüfvorschriften und Messmethoden entwickelt. Dazu wurde den Herstellern aufgetragen, ihre qualitätssichernden Maßnahmen an diesen Vorschriften zu orientieren.

Eine dieser Vorschriften wurde von der *Fa. Bosch* herausgegeben, wobei zur Vorschrift auch das passende Prüfgerät entwickelt worden ist. Die Prüfmethode erlaubt es, den spezifischen Widerstand einer Probe zu bestimmen. In der Folge werden das in diesem Prüfgerät genutzte Messprinzip dem Voltmeter-Amperemeter Verfahren gegenüberstellen.

MESSPRINZIP DER WIRBELSTROMSONDE

Es wurde gezeigt, dass die vorher angewendete Methode durch das Einstellen und Messen mit einem bestimmten Abstand einen Mittelwert über die eingestellte Distanz bildet, wobei diese theoretisch auch sehr klein gewählt werden kann. Inhomogenitäten des Material oder Risse in der Oberfläche können dabei nicht erkannt werden. Im Gegensatz dazu kann man mit der so genannten Wirbelstromsonde spezifische Widerstände örtlich kleiner Bereiche bestimmen.

Vorausgesetzt wird eine glatte Oberfläche der Probe. Eine Sonde wird auf den zu prüfenden Bereich aufgesetzt, die Messinformation einem Auswertegerät zugeführt und der ermittelte Messwert angezeigt. Dieser Messwert zeigt den spezifischen elektrischen Widerstand unterhalb der Sonde fallweise auch in Mikrohm•cm¹⁰ an (vgl. [Bo95]). Diese Werte werden aus Gründen der Einheitlichkeit umgerechnet .

Die Sonde ist als eine stromdurchflossene zylindrische Spule mit einem ferromagnetischen Kern und Mantel ausgebildet. An ihrem freien Ende bildet sich ein rotationssymmetrisches Streufeld aus. Weil als Anregungsspannung wahlweise eine Wechselspannung von 10 kHz bzw. 100 kHz vorgesehen ist, bilden sich, sobald die Spule auf ein elektrisch leitfähiges und homogenes Material aufgesetzt

¹⁰ Anstelle von Mikrohm•m beim Voltmeter-Amperemeter Verfahren

wird, in diesem Körper kreisförmige Wirbelströme aus. Diese induzierten Wirbelströme verändern den komplexen Widerstand¹¹ der Spule.

Das Auswertegerät enthält den Generator für die Anregungsspannung, die als Brückenschaltung konzipierte Messschaltung und einen Verstärker mit einem Anzeigeelement.

MESSUNGEN MIT DER WIRBELSTROMSONDE

In einer firmeninternen Messanweisung ist der Messvorgang bis zur Erstellung eines Prüfberichtes Schritt für Schritt festgelegt (vgl. [Sch95]). Nach jedem Einschalten oder Messbereichswchsel muss das Gerät mit Hilfe von Eichnormalen geeicht werden.

Die Proben dürfen keine ferromagnetischen Teile enthalten, da die Messsonden keinen magnetischen Feldern ausgesetzt werden dürfen. In den Bedienungsanweisungen ist sogar festgelegt, dass eisenhaltige Gegenstände, wie Werkzeuge, von der Sonde fernzuhalten sind. Daher kann sie in unserem Fall nur für die Prüflinge aus Kupferpulver bzw. versilbertem Kupferpulver eingesetzt werden.

Der zu erwartende Messfehler liegt, bezogen auf homogene Materialien, trotz umfangreicher Handhabungsanweisungen für die Behandlung der Proben und den Messvorgang, wesentlich höher (um $\pm 10\%$) als beim Voltmeter-Amperemeter Verfahren. Zur Minimierung zusätzlicher Fehler bei quadratischen oder rechteckigen Proben existieren Korrekturwerte, die zur Verbesserung der Messergebnisse von den abgelesenen Werten abzuziehen sind.

¹¹ Bei Proben mit sehr kleinen spezifischen Widerständen, also bei guten Leitern, werden sehr starke Wirbelströme erzeugt. Im Probekörper heben sie das erzeugende Streufeld auf. Damit ist die Eindringtiefe des Feldes gering und die Rückwirkung auf den Gesamtwiderstand der Sonde groß. Bei schlechten Leitern und daher schwachen Wirbelströmen ist die Eindringtiefe des Feldes höher und die Rückwirkung auf den Sondenwiderstand gering.

In Abbildung 6.16 ist der Messplatz für die Widerstandsmessung gezeigt. Der gedrückte Hebel fixiert den Prüfling zwischen der Sonde und dem Auflagetisch und startet den Messvorgang. Die Sonde selbst ist jener zylindrische Teil, der auf den Prüfling aufgesetzt ist. Die oben erwähnten Korrekturen sind anzuwenden, wenn der Durchmesser der Auflagefläche der Sonde kleiner als die gesamte Sonden zuzüglich der Trägerhülse ist¹². Zusätzlich werden Korrekturen bei Unterschreitung von Mindestmaterialstärken notwendig (3 mm).



Abb. 6.16: Messplatz für Widerstandsmessung [Werkbild Schunk]

Hauptvorteil¹³ dieser Messung ist, dass Aussagen über sehr kleine Proben oder an unterschiedlichen Stellen größerer Proben getroffen werden können.

¹² Insgesamt beträgt der Durchmesser 6 mm, wobei die Sonde selbst nur 4 mm beansprucht. Die mit einem Kunstharz in die Trägerhülse eingekittete Sonde muss planparallel aufliegen, da der Abstand zwischen Sonde und Probe das Messergebnis stark verfälscht. Aus diesem Grund sind nur ebene Proben mit einer glatten Oberfläche zulässig.

¹³ Ebenfalls als vorteilhaft ist der Umstand des Fehlens einer Kontaktierung durch Messspitzen.

MESSUNGEN AN DEN PROBEN DER VERSUCHSREIHE 1

Für diese Messungen wurde mangels vergleichbarer normierter Vorschriften eine eigene Messvorschrift definiert. Dazu sind gemäß der Skizze Abbildung 6.17 Messpunkte bestimmt worden. Diese Messungen wurden an allen vorgesehenen Messpunkten jedoch nur an einigen Probekörper durchgeführt und die ermittelten Ergebnisse in Tabellen festgehalten.



Abb. 6.17: Messpunkt an den Proben (Cu, Cu-Ag)

Die Reihe der Messpunkte liegt in der Mittelachse der Proben und diese liegen symmetrisch jeweils in Schritten von ca. 2 mm voneinander entfernt unter Einhaltung eines Mindestabstandes von den Rändern. Die Schrittmaße wurden so genau wie möglich gemessen. Auf Grund der Messmethode ist ein Anzeichnen einer Teilung mittels Bleistift (Leitfähigkeit von Graphit) genau so das Ergebnis beeinflussend wie ein Einritzen von Markierungsstrichen (Veränderung des Stromflusses der Wirbelströme). Als Messachsen wurde jeweils die Mittellinie der Probe sowohl von der Breite wie auch der Höhe gewählt.

Probe (Druck)	Material	Abmessungen $H [10^{-3} \text{ m}] \times T [10^{-3} \text{ m}]$	Richtung der Messung	Messpunkt	spez. Widerstand $\rho [\mu\Omega \cdot \text{m}]$
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	1	0,221
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	2	0,227
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	3	0,261
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	4	0,334
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	5	0,297
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	6	0,252
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	1	0,221
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	2	0,223
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	3	0,288
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	4	0,307
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	5	0,289
4 (0,7 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	6	0,260

Tab. 6.12: Spezifischer Widerstand der Probe 4 (Cu-Ag) Länge: 18,54 mm

Die Darstellung dieser Messreihe mit geglätteter Kurve in einer Graphik (Abb. 6.18) zeigt ein Maximum in der Nähe des Messpunktes 4. Die Verpressung des Pulvers an der Oberstempelseite (Messpunkt 1) ist deutlich höher als an der Unterstempelseite. Wie vermutet, schieben sich die Pulverteilchen auf Grund der Reibung an den Wänden der Matrize an den Stirnflächen der Probe stärker zusammen wie etwa in der Mitte.

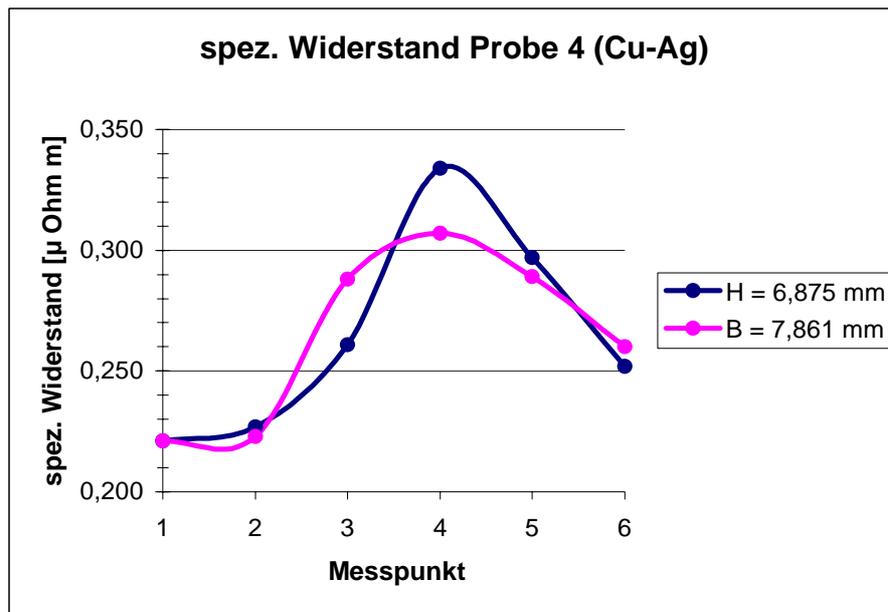


Abb. 6.18: Spezifischer Widerstand der Probe 4 (Cu-Ag)

Bemerkenswert ist der Umstand, dass die Mittelwerte dieser Messungen, die etwa einen Abstand von 10 mm Länge betrachten, sowohl bei der Höhe als auch bei der Breite den gleichen Wert von $0,265\ \mu\Omega\text{-m}$ ergeben und dass bei der gleichen Probe mit Hilfe des Voltmeter-Amperemeter Verfahrens, das bekanntlich als Ergebnis einen Mittelwert liefert, als spezifischen Widerstand $0,27\ \mu\Omega\text{-m}$ über eine Distanz von 10 mm Länge ermittelt wurde.

Der Einfluss der Probenbreite auf das Messergebnis ist ebenfalls deutlich aus den Kurven in Abb. 6.18 ablesbar. Die Ausbreitung der Wirbelströme wird bei der geringeren Breite an den Rändern auf Grund der Abmessungen der Probe begrenzt. Dadurch wird ein höherer spezifischer Widerstand bei schmäleren Proben angezeigt.

Bei den Proben, die mit höheren Pressendrücken erzeugt worden sind, musste auf Grund der höheren Verkürzung die Anzahl der Messpunkte reduziert werden.

In Tabelle 6.13 sind die Ergebnisse der Probe Nr. 11 des gleichen Stampfpulvers gezeigt, die mit dem Pressendruck in der Höhe von 1 t erzeugt worden ist.

Probe (Druck)	Material	Abmessungen $H [10^{-3} \text{ m}] \times T [10^{-3} \text{ m}]$	Richtung der Messung	Messpunkt	spez. Widerstand $\rho [\mu\Omega \cdot \text{m}]$
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	1	0,106
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	2	0,125
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	3	0,144
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	4	0,147
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	5	0,126
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	1	0,097
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	2	0,109
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	3	0,125
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	4	0,134
11 (1 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	5	0,123

Tab. 6.13: Spezifischer Widerstand der Probe 11 (Cu-Ag) Länge: 16,24 mm

Die Darstellung dieser Messreihe mit geglätteter Kurve in der Graphik (Abb. 6.19) zeigt, wie vorher, ein Maximum in der Nähe des Messpunktes 4.

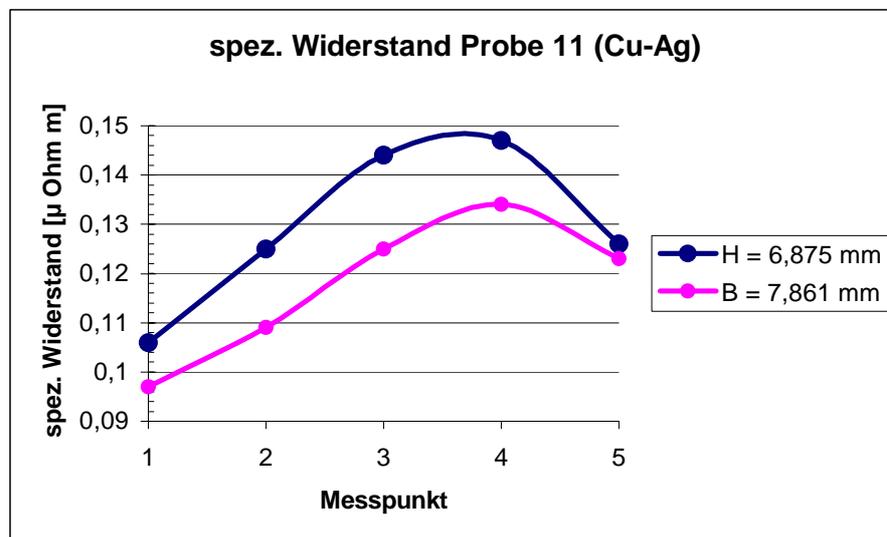


Abb. 6.19: Spezifischer Widerstand der Probe 11 (Cu-Ag)

Auch bei dieser Messreihe stimmen die Mittelwerte dieser Messungen mit den vorher getätigten gut überein. Die festgestellte Differenz der Mittelwerte für die Messreihe „Höhe“ ist Null ($0,130 \mu\Omega \cdot \text{m}$), der Mittelwert für die Messreihe „Breite“ beträgt $0,118 \mu\Omega \cdot \text{m}$.

In Tabelle 6.14 sind die Ergebnisse der Probe Nr. 8 des gleichen Stampfpulvers gezeigt, die mit dem Pressendruck in der Höhe von 1,4 t erzeugt worden ist.

Probe (Druck)	Material	Abmessungen $H [10^{-3} \text{ m}] \times T [10^{-3} \text{ m}]$	Richtung der Messung	Messpunkt	spez. Widerstand $\rho [\mu\Omega \cdot \text{m}]$
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	1	0,087
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	2	0,097
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	3	0,133
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	4	0,128
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Höhe	5	0,089
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	1	0,081
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	2	0,105
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	3	0,132
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	4	0,112
8 (1,4 t)	Cu-Ag	6,875x7,861	Breite	5	0,084

Tab. 6.14: Spezifischer Widerstand der Probe 8 (Cu-Ag) Länge: 15,33 mm

Die Darstellung dieser Messreihe mit geglätteter Kurve in der Graphik (Abb. 6.20) zeigt ein in Richtung des Oberstempels verschobenes Maximum in der Nähe der Probenmitte (Messpunkt 3).

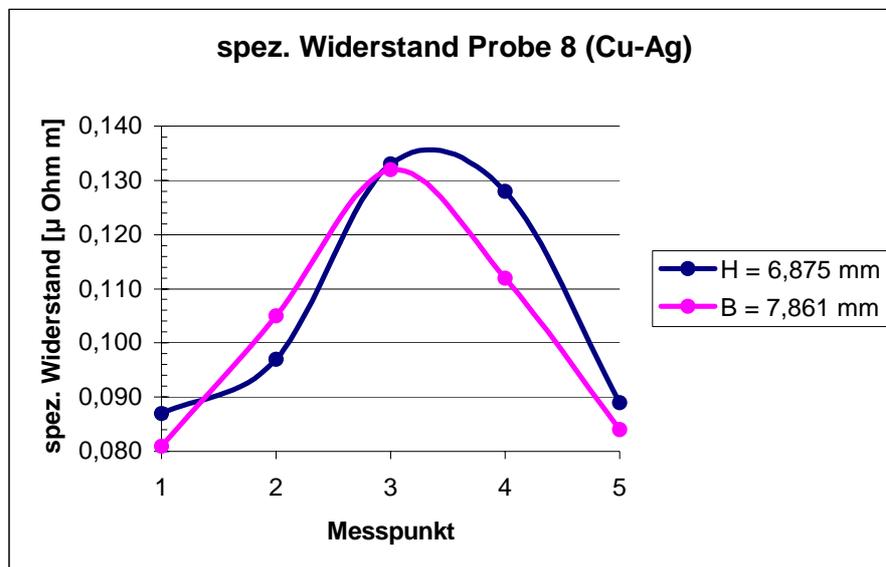


Abb. 6.20: Spezifischer Widerstand der Probe 8 (Cu-Ag)

Auch bei dieser Messreihe stimmen die Mittelwerte der Messungen mit den vorher getätigten gut überein. Der festgestellte Mittelwerte für die Messreihe „Höhe“ für den spezifischen Widerstand ist $0,107 \mu\Omega \cdot \text{m}$, der Mittelwert für die Messreihe

„Breite“ beträgt $0,103 \mu\Omega\cdot\text{m}$ und der mit dem Voltmeter-Amperemeter Verfahren ermittelte Wert beträgt $0,100 \mu\Omega\cdot\text{m}$.

MESSUNGEN AN DEN PROBEN DER VERSUCHSREIHE 2

Da diese Proben sehr klein sind, sind Messungen nur auf den Stirnseiten der Prüflinge möglich. Als Messmethode wurde auf Grund der Probenabmessungen die oben beschriebene Wirbelstrom Messmethode angewendet.

Eine Besonderheit dieser Methode ist, dass auf Grund der hohen Empfindlichkeit der Messeinrichtung nicht nur alle Verletzungen der Oberfläche sondern auch Beschriftungen durch Graphitstifte das Messergebnis verfälschen können¹⁴. Weil alle Proben zur Identifikation an der Unterstempelseite mit Bleistift nummeriert worden sind, fällt diese Fläche für die Messung weg, so dass nur auf der Oberstempelseite gemessen worden ist. Anzumerken ist, dass die Probegröße an der Oberfläche ($6,10 \times 7,77 \text{ mm}$) auch deshalb ausgewählt worden ist, um die geforderte Mindestfläche ($6,0 \times 6,0 \text{ mm}$) zu überschreiten. Die Höhen der Proben zeigen, dass die geforderte Mindestdicke von 3 mm nur bei wenigen Proben erreicht worden sind. Bei diesen Proben wurden die vorgeschriebenen Korrekturen¹⁵ der Werte vorgenommen (vgl. [Bo95]).

In den beiden folgenden Tabellen (6.15 und 6.16) sind die Ergebnisse der Messungen für das Kupferpulver (Nr. 3) und das Silberpulver (Nr. 6) gezeigt¹⁶.

¹⁴ Auf diesen Umstand wird in der Bedienungsanweisung ausdrücklich hingewiesen.

¹⁵ Im Gegensatz zur Korrekturvorschrift bei zu geringer Breite, wobei Kurven in Abhängigkeit von Messwerten beachtet werden müssen, ist die Dickenkorrektur nahezu linear. Es sind bei einer Dicke von $2,1 \text{ mm}$ $2,5 \%$ des abgelesenen Wertes abzuziehen, bei $2,7 \text{ mm}$ ist der Korrekturwert mit $1,5 \%$ zu berücksichtigen. Ab einer Dicke von $3,5 \text{ mm}$ ist keine Korrektur erforderlich.

¹⁶ Durch eine Unaufmerksamkeit wurde auch versucht, Messungen an den Proben für Eisenpulver vorzunehmen. Der Effekt war, dass anfänglich noch plausible Werte abzulesen waren, bald jedoch nur noch Fehleranzeigen wegen Fehlmessungen erfolgten. Die Ursache war die Nichtbeachtung jener Messvorschrift, die ausdrücklich nur Messungen an nicht magnetisierenden Materialien zulässt. Daher musste nach dem Entmagnetisieren der Sonde das Gerät neu geeicht werden.

Messung	0,5 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]	0,9 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]	1,5 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	2,73	1,37	2,45	0,422	2,39	0,321
2	2,72	1,20	2,47	0,404	2,40	0,317
3	2,72	1,33	2,47	0,417	2,41	0,310
4	2,76	1,01	2,45	0,418	2,43	0,318
5	2,74	1,23	2,46	0,433	2,41	0,302
6	2,74	1,12	2,45	0,443	2,41	0,314
7	2,73	1,27	2,48	0,378	2,39	0,332
8	2,73	1,23	2,43	0,441	2,40	0,323
9	2,72	1,96	2,47	0,396	2,40	0,318
10	2,73	1,22	2,45	0,434	2,41	0,320
11	2,75	1,06	2,47	0,409	2,39	0,316
12	2,73	1,30	2,48	0,442	2,40	0,313
13	2,73	1,21	2,48	0,419	2,40	0,328
14	2,73	1,13	2,45	0,487	2,40	0,323
15	2,72	1,28	2,45	0,477	2,41	0,314
16	2,74	1,10	2,48	0,419	2,42	0,314
17	2,69	1,68	2,47	0,412	2,40	0,321
18	2,73	1,21	2,46	0,442	2,42	0,313
19	2,75	1,06	2,43	0,466	2,41	0,311
20	2,72	1,32	2,45	0,405	2,41	0,308
21	2,75	1,03	2,52	0,415	2,40	0,320
MIN	2,69	1,01	2,43	0,378	2,390	0,302
MAX	2,76	1,96	2,52	0,487	2,430	0,332
MITTEL	2,73	1,25	2,46	0,428	2,405	0,317
MITTEL korrigiert		1,23		0,418		0,309

Tab. 6.15: Widerstandswerte 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3

In der Tabelle 6.15 sind die abgelesenen Werte vermerkt. Für die Korrektur der abgelesenen Werte wurde wie folgt vorgenommen (Formel 6.3):

$$\text{Korrektur} = \frac{2,7 \cdot \text{Probendicke} - 9,45}{1,5} [\%] \quad (6.3)$$

Diese Formel gilt nur für Probendicken im Bereich [2 mm, 3,5 mm]. Für den korrigierten Widerstandswert gilt somit (Formel 6.4):

$$\text{Korrigierter Widerstand} = \text{gemessener Wert} \cdot \left(1 + \frac{\text{Korrektur}}{100} \right) \quad (6.4)$$

Messung	0,5 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]	0,9 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]	1,5 [t]	spez. Wi- derstand ρ [$\mu\Omega \cdot m$]
	Höhe [mm]		Höhe [mm]		Höhe [mm]	
1	2,50	0,076	2,19	0,054	2,12	0,045
2	2,50	0,076	2,25	0,054	2,13	0,046
3	2,47	0,078	2,25	0,056	2,09	0,047
4	2,45	0,080	2,24	0,054	2,11	0,049
5	2,49	0,076	2,26	0,054	2,13	0,048
6	2,48	0,077	2,25	0,055	2,12	0,047
7	2,47	0,077	2,27	0,054	2,14	0,044
8	2,42	0,075	2,28	0,054	2,14	0,049
9	2,50	0,075	2,22	0,054	2,13	0,044
10	2,47	0,078	2,28	0,054	2,11	0,046
11	2,49	0,077	2,28	0,054	2,09	0,046
12	2,50	0,076	2,24	0,054	2,15	0,046
13	2,50	0,076	2,22	0,054	2,13	0,048
14	2,49	0,076	2,24	0,054	2,10	0,049
15	2,48	0,076	2,28	0,054	2,10	0,046
16	2,48	0,077	2,22	0,053	2,10	0,047
17	2,48	0,079	2,21	0,053	2,12	0,049
18	2,48	0,078	2,18	0,053	2,13	0,045
19	2,47	0,077	2,23	0,055	2,14	0,045
20	2,51	0,076	2,25	0,053	2,10	0,050
21	2,50	0,076	2,27	0,052	2,14	0,046
MIN	2,420	0,075	2,180	0,052	2,090	0,044
MAX	2,510	0,080	2,280	0,056	2,150	0,050
MITTEL	2,482	0,077	2,243	0,054	2,120	0,047
MITTEL korrigiert		0,076		0,053		0,046

Tab. 6.16: Widerstandswerte 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6

In der Tabelle 6.16 sind die abgelesenen Werte vermerkt. Auch hier wurde die vorgeschriebene Korrektur durchgeführt.

ZWEITES ZWISCHENERGEBNIS

Die Geringfügigkeit der Abweichungen von den Messwerten für den spezifischen Widerstand der Proben, die mit Hilfe der grundsätzlich unterschiedlichen Messverfahren gewonnen worden sind ist deshalb bemerkenswert, weil seitens der für die Qualitätskontrolle zuständige Abteilung der *Fa. Bosch* das Voltmeter-Ampere-meter Verfahren als zu wenig genau abgelehnt wird.

Der nahezu lineare Anstieg und Abfall der Widerstandskurve von der Messreihe „Breite“ der Probe 8 zeigt, dass in der Nähe des Ober- bzw. Unterstempels der Presse das Material bereits stark verdichtet sein muss. Unmittelbar vergleichbar bezüglich der Messpunkte für den spezifischen Widerstand sind der Proben 11 (1 t Pressendruck) bzw. 8 (1,4 t Pressendruck). Eine erwartete gleichmäßige Verbesserung des Widerstandes kann bei diesen Messreihen nicht gezeigt werden (Abb. 6.21).

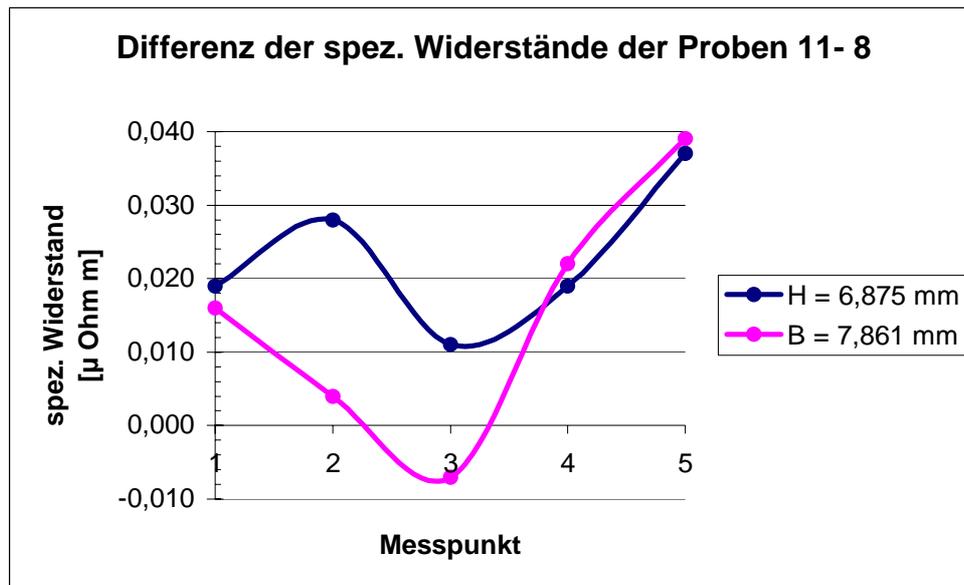


Abb. 6.21: Differenz der spezifischen Widerstände der Proben 11 und 8 (1 t/1,4 t)

Die Interpretation der Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe aus den Messungen für den spezifischen Widerstand ist nicht eindeutig einzuordnen.

Einerseits liegen die Werte deutlich niedriger, als bei den Messungen der Versuchsreihe 1. Dieser Umstand ist durchaus zu erwarten gewesen. Andererseits wurde jedoch festgestellt, dass der Verpressungsgrad und die prozentuelle Verpressung Unterschiede zur Versuchsreihe 1 aufweisen, so dass alleine durch diesen Umstand ein kleinerer spezifischer Widerstand zu erwarten war.

Eindeutig ist jedoch die Tendenz, dass bei steigenden Pressdrücken niedrigere spezifische Widerstände festzustellen waren.

6.2.3 DER WIDERSTAND DES UNVERPRESSTEN PULVERS

Der Widerstand von unverpresstem Pulver kann nicht direkt bestimmt werden. In Anlehnung an eine Messmethode, die für die Widerstandsermittlung von kohlenstoffhaltigen Pulvermaterialien entwickelt worden ist, wurden die folgenden Messungen durchgeführt.

Die Versuchsanordnung besteht aus einer Vorrichtung zur Aufnahme des Pulvers und einer Messeinrichtung mit digitaler Anzeige, die Widerstandswerte in einem Messbereich von 0 Ohm bis 6450 k Ω direkt anzeigen kann¹⁷. Mittels Prüfkabeln wird der Pulverbehälter mit dieser Messeinrichtung verbunden.

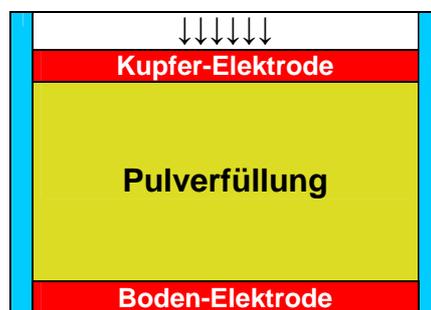


Abb. 6.22: Vorrichtung zur Aufnahme des Pulvers

Die in Abbildung 6.22 gezeigte Vorrichtung zur Aufnahme des Pulvers besteht aus einem Glaszylinder mit dem Innendurchmesser von 36,853 mm, also einer Bodenfläche von 1067 mm², die am Boden eine als untere Elektrode ausgebildete Kontaktfläche besitzt. In das so gebildete Gefäß wird das zu untersuchende Pulver bis zu einer Höhe von 150 mm gefüllt. Das zur Messung benötigte lose geschüttete Pulvervolumen beträgt 160 cm³. Danach wird eine zylindrische Kupferelektrode auf die Füllung gelegt deren Gewicht (186 g) genau senkrecht auf das Pulver wirkt. Zusätzlich können zur Verstärkung der Gewichtskraft weitere Gewichte aufgelegt werden¹⁸. Auf Grund der eher geringen Gewichte kann man hier zunächst von nahezu unverpresstem Pulver ausgehen.

¹⁷ Das verwendete Messgerät steht im Besitz der Fa. *Schunk*, Werk Heuchelheim (Gießen). Die Messschaltung ist eine Brückenschaltung, über die keine weiteren Angaben bezüglich Schaltdetails bzw. Genauigkeit der Messung vorliegt.

¹⁸ Derartige Messungen werden bei der Herstellung von Graphitkörpern aus Pulver benötigt, die bei einer thermischen Behandlung in einem Elektroofen gestapelt werden. Die benötigte Wärmeenergie stammt aus der Verlustwärme der gestapelten Körper bei Stromdurchfluss. Durch Bestimmung der Widerstände kann die benötigte Wärme durch die Regelung des Stromes eingestellt werden.

In der Versuchsdurchführung wurde das Pulver durch die Zusatzgewichte mehr und mehr belastet. Die Versuche wurden mit den bereits bekannten Stampfpulver vorgenommen und die Ergebnisse in der Tabelle 6.17 zusammengefasst.

Gewicht der Elektrode [10 ⁻³ kg]	Kupferpulver Widerstand [Ω·10 ³]	Kupfer versilbert Widerstand [Ω·10 ⁻³]	Eisenpulver Widerstand [Ω·10 ³]
186	6450 (ungültig)	1550	600
286	ungültig	1850	580
686	ungültig	2000	150
1186	ungültig	2050	50
3186	ungültig	660	4,400
5186	ungültig	270	1,500

Tab. 6.17: Widerstand der Pulver (Cu-Ag, Fe)

Zunächst überrascht, dass beim Kupferpulver keine gültigen Messungen möglich gewesen sind, da das Auswertegerät jeweils nur den Endausschlag bzw. Messbereichsüberschreitung angezeigt hat. Erwartet wurde, dass die Messwerte zwischen jenen für versilbertes Kupferpulver und Eisenpulver liegen müssten. Nach den Ergebnissen der hier vorliegenden Messungen zeigt dieses Kupferpulver isolierende Eigenschaften. Es wird vermutet, dass das verwendete Kupferpulver mit einer Schutzschicht überzogen ist („stabilisiert“), die erst durch den Stampfvorgang mechanisch zerstört wird und so die Kontaktierung ermöglicht. Ein Schutz des Pulvers vor Oxydation ist durchaus wünschenswert, um mögliche Beeinträchtigungen der Qualität des Pulvers etwa durch längere Lagerung zu verhindern.

In der Abbildung 6.23 das Ergebnis für das Eisenpulver graphisch dargestellt.

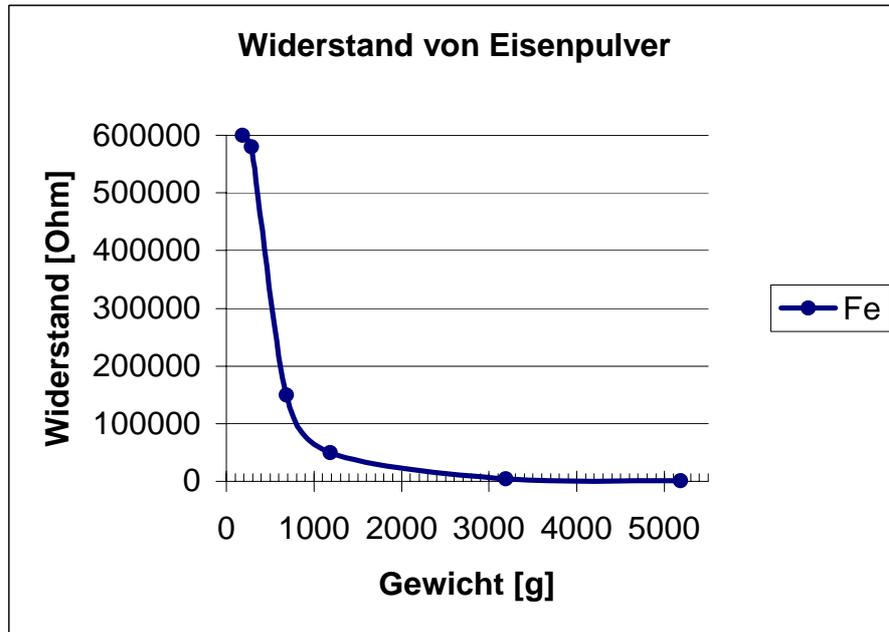


Abb. 6.23: Messpunkte Widerstand des Eisenpulvers

Das hier gezeigte Ergebnis ist erwartet worden. Durch eine höhere Belastung schieben sich die Pulverpartikel enger ineinander, bilden mehr und großflächigere Kontaktstellen aus und insgesamt sinkt der Widerstand der Pulversäule.

In Abbildung 6.24 das Ergebnis für das versilberte Kupferpulver graphisch dargestellt.

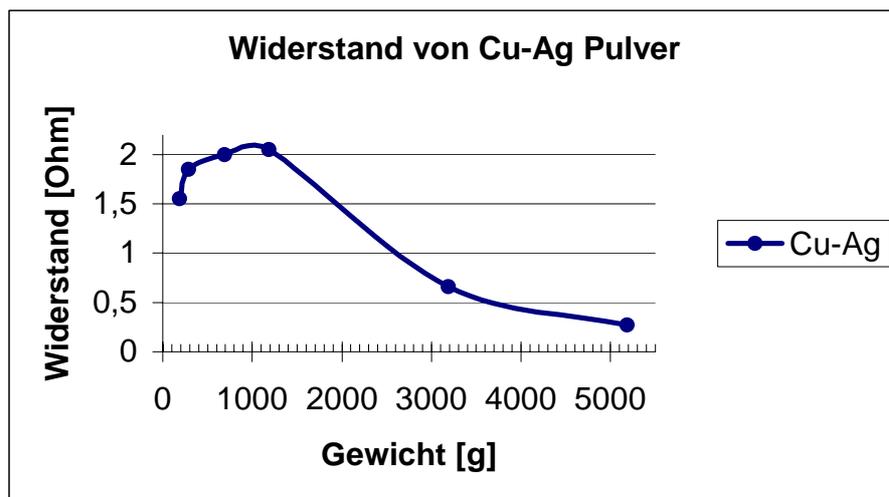


Abb. 6.24: Messpunkte Widerstand des versilberten Kupferpulver

Das hier gezeigte Ergebnis ist so nicht erwartet worden, da die Widerstandswerte bei geringer Belastung zunächst ansteigen. Erst bei einer höheren Belastung zeigt die Kurve den erwarteten Verlauf, der wie vorher interpretiert werden kann.

Um dennoch Werte für reines Kupferpulver zu erhalten, wurde dieses Pulver einer Wärmebehandlung unter Schutzgas¹⁹ ausgesetzt und danach der oben beschriebene Messvorgang wiederholt. Die gemessenen Werte sind in der Tabelle 6.18 zusammengefasst und den vorher erzielten Werten gegenübergestellt.

Gewicht der Elektrode [10 ⁻³ kg]	Kupferpulver behandelt Widerstand [Ω]	Kupfer versilbert Widerstand [Ω·10 ⁻³]	Eisenpulver Widerstand [Ω·10 ³]
186	35000	1550	600
286	18000	1850	580
686	900	2000	150
1186	86	2050	50
3186	9,2	660	4,400
5186	5,4	270	1,500

Tab. 6.18: Widerstand der Pulver (Cu wärmebehandelt, Cu-Ag, Fe)

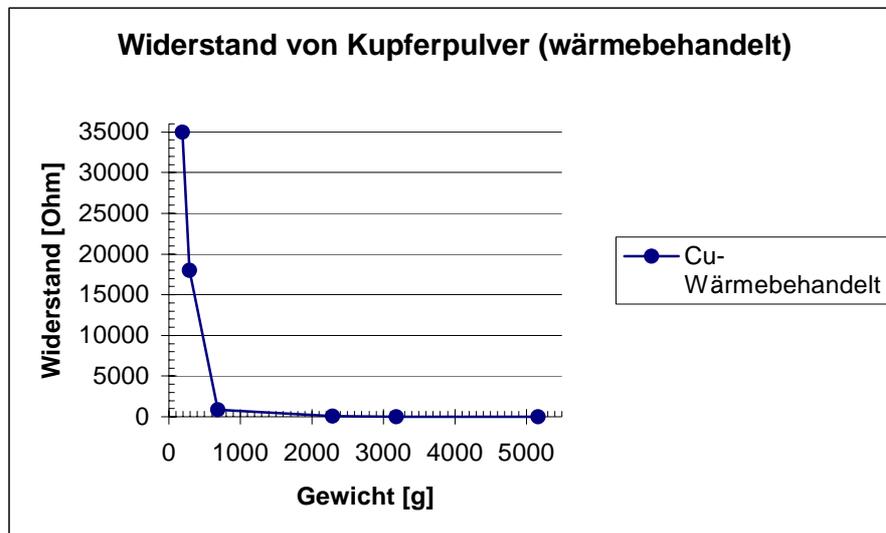


Abb. 6.25: Messpunkte Widerstand des wärmebehandelten Kupferpulvers

¹⁹ Über das angewendete Verfahren ist nur bekannt, dass eine Wasserstoff-Stickstoff Atmosphäre verwendet wurde und ein bestimmtes Temperaturprofil erzeugt worden sind. Dieses Verfahren wird auch bei anderen Prozessen bei der Fa. *Schunk* angewendet und gilt als Herstellergeheimnis.

Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass diese Vorgehensweise nicht unmittelbar mit den beim Stampfvorgang sich ergebenden Einflüssen übereinstimmt, die erzielten Ergebnisse also nur zu Vergleichszwecken herangezogen werden dürfen.

6.3 MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES

In diesem Abschnitt werden Eigenschaften realer Stampfkontakte untersucht. Eine Faustformel bei der Erzeugung von Stampfkontakten ist, eine Füllhöhe des Pulvers von 1 mm auf eine Höhe von 0,5 mm zusammenzupressen. Stapelt man in einem Gedankenexperiment Pulverkörner übereinander, ergibt sich bei der durchschnittlichen verwendeten Korngröße ein Stapel von vier Körnern, die auf die halbe Höhe zusammengeschoben werden.

6.3.1 STAMPFKONTAKTE MIT VERSILBERTEM KUPFERPULVER

Die weiter oben durchgeführten Untersuchungen haben nachgewiesen, dass bei kleinerer Füllhöhe eine höhere spezifische Verdichtung erreicht wird und gleichzeitig auch der spezifische Widerstand des verpressten Pulvers kleiner wird. Ziel der Untersuchung ist es, den Zusammenhang zwischen der Füllhöhe und den durch die Verpressung abzuleitenden Parametern Widerstand und Festigkeit zu untersuchen.

Für den Versuch wird bei der gegebenen Füllhöhe mit gleichbleibender Schlagfrequenz und dem gleichen Federsatz, jedoch mit einer unterschiedlicher Anzahl von Schlägen in vier Versuchen eine Anzahl Kohlebürsten erzeugt und danach ihre Eigenschaften überprüft. Durch die Variation der Anzahl der Schläge werden unterschiedliche Mengen Stampfpulver dosiert. Als Stampfpulver wurde das versilberte Kupferpulver (Stampfpulver Nr. 6) verwendet. Die gesamte Füllhöhe von 11 mm wird dabei mit rund 10, 20, 30 und 40 Stampfhüben gefüllt und verdichtet. Die exakte Anzahl der Stampfhübe ergibt sich aus dem Pulverzufluss und wird in die Untersuchung mit einbezogen. Zur Verstärkung der Schlagenergie ist der Federsatz $4 \times F$ (23 N/mm) verwendet worden.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 6.19 zusammengestellt. Als Messverfahren wurde das Voltmeter-Amperemeter Verfahren verwendet, die Messpunkte nach DIN221 gewählt (vgl. [DIN221]).

Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]	Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]
1	10	0,108	27	29	0,098
2	10	0,114	28	28	0,090
3	10	0,127	29	30	0,096
4	12	0,093	30	31	0,090
5	11	0,087	31	31	0,098
6	11	0,110	32	30	0,091
7	11	0,111	33	32	0,090
8	10	0,132	34	30	0,096
9	11	0,082	35	32	0,084
10	10	0,145	36	32	0,083
11	11	0,102	37	34	0,114
12	12	0,096	38	30	0,120
13	16	0,086	39	30	0,086
14	19	0,076	40	39	0,096
15	19	0,086	41	40	0,062
16	19	0,086	42	40	0,078
17	20	0,083	43	41	0,065
18	20	0,076	44	32	0,082
19	21	0,081	45	43	0,091
20	21	0,072	46	45	0,087
21	21	0,080	47	41	0,095
22	21	0,071	48	44	0,083
23	22	0,051	49	40	0,096
24	25	0,070	50	44	0,086
25	20	0,069	51	43	0,113
26	19	0,075	52	41	0,105

Tab. 6.19: Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge

In Abbildung 6.26 das Ergebnis für das versilberte Kupferpulver graphisch dargestellt.

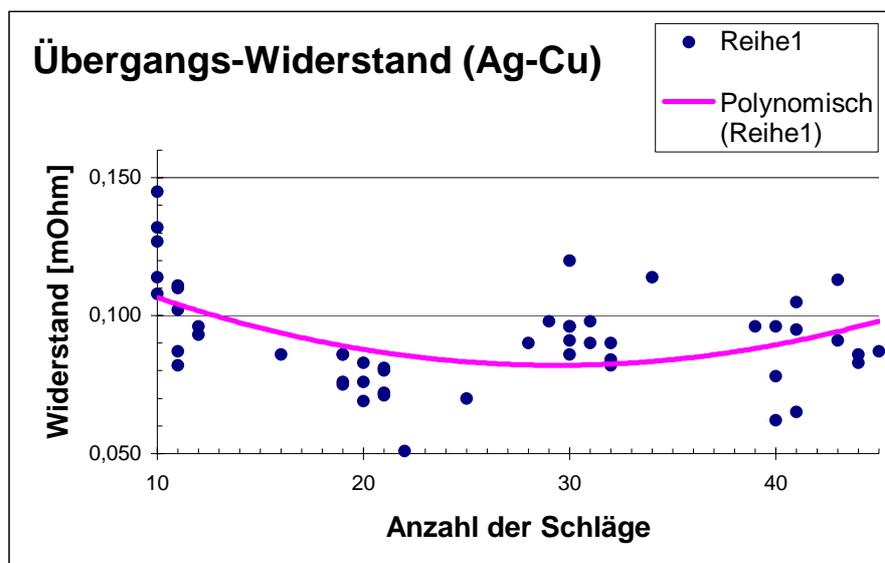


Abb. 6.26: Übergangs-Widerstandswerte, Anzahl der Schläge

Unter der (realistischen) Annahme einer Knotenhöhe von 1 mm ergibt sich bei 10 Stampfhüben eine durchschnittliche verdichtete Höhe von 1 mm/Hub, bei 20 Hüben 0,5 mm/Hub usw. Normalerweise würde für diese Kohle eine verdichtete Höhe von 0,5 mm/Hub bei einer durchschnittlichen Füllhöhe von ca. 1 mm Pulver gewählt werden.

Die Streuung der Messwerte bezogen auf eine bestimmte Schlagzahl ergibt sich aus einer zufälligen Pulververteilung, die bereits weiter oben unterstellt worden ist (vgl. Kapitel 1). Auch die dentritische Form des Pulvers trägt mit seinen ineinander verschobenen Verästelungen und statistisch verteilten Berührungspunkten zur Streuung bei (vgl. Anhang A). Aus diesem Grund werden für 10, 20, 30 und 40 Schläge Mittelwerte betrachtet, um eine Tendenz ablesen zu können. Diese Tendenz zeigt im Bereich (19 bis 21 Stampfhübe) ein Minimum.

Erklärt wird dieses zunächst unerwartete Verhalten durch die Materialeigenschaft des Stampfpulvers. Versilbertes Kupferpulver ist mit einer galvanisch erzeugten Silberschicht überzogen. Solange die Krafteinwirkung beim Stampfen genügend groß für die Festigkeit und genügend gering für die Zerstörung dieser Schicht beim Ineinanderschieben der Pulverpartikel bleibt, wird der erzielte Übergangswiderstand tendenziell kleiner werden bzw. gering bleiben. Ab jener Krafteinwirkung, wo die oberflächliche Silberschicht durch Abrieb zerstört wird, bilden sich größere Verbände aus reinem Kupfer. Deshalb kann der Widerstand bei Überschreiten dieser Grenze nicht mehr wesentlich verringert werden.

Bei einigen Kohlen wurde die Ausreißfestigkeit geprüft. Für die untersuchte Kohletype sollte eine Festigkeit von 341 N erreicht werden. Bei den Messungen wurde zusätzlich unterschieden, ob der Stampfkontakt zusammen mit dem Kabel herausgezogen werden konnte, oder ob die Kohle beim Herausziehen des Kabels zerbrochen ist. Die Werte sind in Tabelle 6.20 zusammengestellt.

Kohle Nr.	Schläge	Zugfestigkeit [N]	Anmerkung
3	10	328	gezogen
4	12	398	gezogen
9	11	348	gezogen
10	10	288	gezogen
15	19	315	gezogen
16	19	448	gezogen
21	21	375	gezogen
22	21	415	gebrochen
27	29	408	gezogen
28	28	506	gezogen
35	32	432	gebrochen
36	32	485	gebrochen

Tab. 6.20: Zugfestigkeit, Anzahl der Schläge

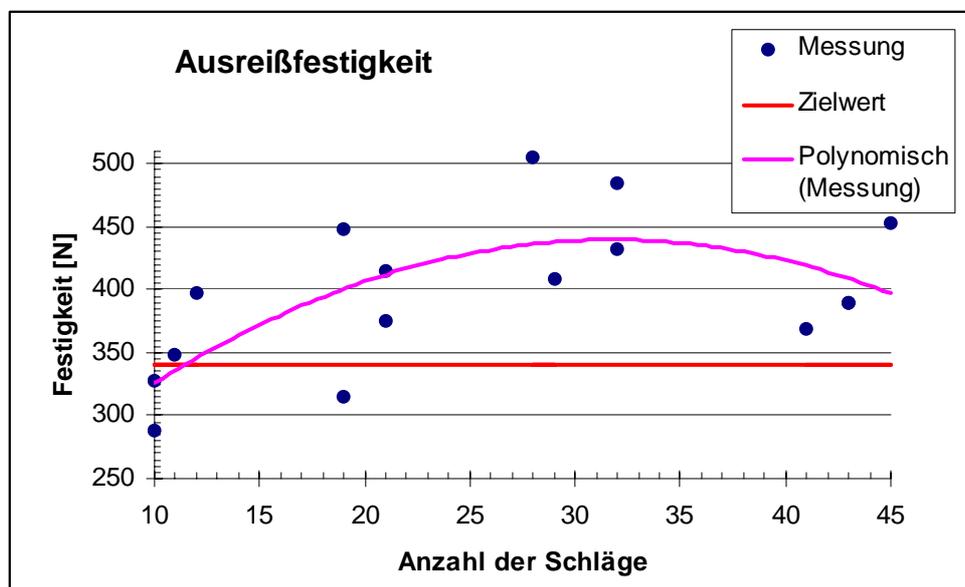


Abb. 6.27: Zugfestigkeit, Anzahl der Schläge

Abbildung 6.27 stellt die Messwerte graphisch dar. Zusätzlich ist die vorgegebene Festigkeit (341 N) und eine polynomische Trendlinie ergänzt. Die Trendlinie unter-

stützt die Beobachtung, dass ab einer bestimmten Anzahl von Schlägen die Festigkeit nicht mehr gesteigert werden kann.

Bei der untersuchten Kohlebürste schneidet die Trendlinie bei etwa 12 Schlägen die zu erreichende Festigkeitslinie. Mit entsprechender Sicherheit sollte diese Kohlentype mit 14 bis 16 Stampfhüben erzeugt werden. Gegenüber der eingangs gemachten Vorgabe (20 bis 22 Schläge) kann hier die Schlagzahl um 25 % verringert werden.

Die Kohlen sind einem Alterungsprozess unterworfen. Zur Illustration sind bei einigen, nach dem Zufallsprinzip ausgewählten Kohlen, die Messungen nach etwa 18 Stunden wiederholt worden. Die stark uneinheitlichen Ergebnisse sind in Tabelle 6. 21 zusammengefasst. Abgesehen von der viel zu kurzen Alterungszeit sind auf Grund der Ergebnisse sichere Aussagen nicht möglich.

Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]	Übergangs Widerstand (18 Stunden) [mΩ]	Änderung [%]
17	20	0,083	0,087	4,8
18	20	0,076	0,091	19,7
19	21	0,081	0,081	0
20	21	0,072	0,072	0
23	22	0,051	0,073	43,1
24	25	0,070	0,085	21,4
25	20	0,069	0,069	0
26	19	0,075	0,073	- 2,6
34	30	0,096	0,096	0

Tab. 6.21: Übergangs Widerstandswerte, Alterung nach 18 Stunden

6.3.2 STAMPFKONTAKTE MIT KUPFERPULVER

Für das Kupferpulver wurde weiter oben festgestellt, dass dieses wegen seiner Schutzschicht erst durch den Stampfvorgang seine Leitfähigkeit erlangt. Auf Grund der zur Verfügung stehenden Anzahl von Kohlebürsten wurden weniger Stampfkontakte als bei der vorhergehenden Messreihe erzeugt. Diese Werte sind in Tabelle 6.22 angeführt.

Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]	Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]
1	10	0,170	24	21	0,135
2	10	0,208	25	33	0,154
3	11	0,155	26	33	0,157
4	10	0,219	27	31	0,136
5	10	0,210	28	36	0,142
6	9	0,209	29	28	0,132
7	9	0,156	30	29	0,128
8	10	0,146	31	29	0,137
9	10	0,139	32	31	0,122
10	11	0,153	33	29	0,120
11	11	0,145	34	29	0,122
12	10	0,151	35	30	0,132
13	21	0,129	36	31	0,146
14	20	0,139	37	33	0,118
15	22	0,108	38	21	0,109
16	21	0,106	39	42	0,088
17	19	0,103	40	20	0,092
18	21	0,109	41	51	0,105
19	20	0,089	42	42	0,116
20	19	0,101	43	53	0,101
21	21	0,132	44	30	0,137
22	18	0,112	45	49	0,120
23	23	0,129			

Tab. 6.22: Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Cu)

In Abbildung 6.28 das Ergebnis für das Kupferpulver graphisch dargestellt.

Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]	Kohle Nr.	Schläge	Übergangs Widerstand [mΩ]
1	11	0,768	31	20	0,676
2	11	0,697	32	19	0,690
3	11	0,730	33	20	0,672
4	10	0,716	34	19	0,724
5	10	0,713	35	38	0,696
6	11	0,697	36	40	0,775
7	11	0,775	37	38	0,772
8	11	0,639	38	42	0,803
9	11	0,754	39	39	0,799
10	12	0,730	40	39	0,730
11	12	0,651	41	40	0,775
12	13	0,648	42	38	0,758
13	10	0,764	43	51	0,768
14	8	1,049	44	51	0,752
15	20	0,622	45	33	0,790
16	20	0,620	46	41	0,846
17	18	0,687	47	40	0,581
18	18	0,678	48	21	0,657
19	26	0,659	49	30	0,694
20	20	0,730	50	28	0,701
21	18	0,621	51	35	0,674
22	23	0,771	52	32	0,839
23	24	0,633	53	25	0,670
24	12	0,665	54	15	0,748
25	26	0,729	55	31	0,628
26	13	0,740	56	15	0,801
27	19	0,652	57	31	0,694
28	20	0,660	58	12	0,771
29	19	0,646	59	23	0,781
30	20	0,654	60	49	0,715

Tab. 6.23: Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Fe)

In Abbildung 6.29 das Ergebnis für das Eisenpulver graphisch dargestellt. Wegen der starken Streuung der Messergebnisse werden diese nicht weiter untersucht.

Beim Kupferpulver wurde, wie erwartet, eine tendenzielle Verbesserung der elektrischen Eigenschaften mit höherer Schlagzahl festgestellt. Die Festigkeit wurde nicht untersucht.

Die Streuung der Messergebnisse waren auch auf Grund der Herstellung der Stampfkontakte nicht geeignet, weiter untersucht zu werden. Auch bei dieser Messreihe wurde auf die weitere Untersuchung der Festigkeit verzichtet.

6.3.5 ABSCHLIEßENDE BETRACHTUNGEN

Ein wesentlicher Punkt bei allen Untersuchungen sind die Materialeigenschaften des Grundmaterials Kohle. Diese Eigenschaften wurden angedeutet, aber nicht untersucht. Speziell bei der Messung des Übergangswiderstandes muss jedoch der Widerstand der Kohle berücksichtigt werden.

Für die untersuchte Kohle wurde zunächst die Annahme getroffen, dass, weil die geprüften Kohlen einer Charge entstammen, von weitgehend gleichen Materialeigenschaften ausgegangen werden kann. Diese Annahme ist falsch, da bereits in der Spezifikation des Grundmaterials ein spezifischer Widerstand im Bereich von 40 bis 60 $\mu\Omega\text{m}$ definiert wird.

Auf Grund des höheren spezifischen Widerstandes von Eisenpulver wird der Widerstandswert der Stampfkontakte mit diesem Pulver zwar weniger deutlich verfälscht, dieser Einfluss darf selbst hier nicht vernachlässigt werden. Für genaue Messungen muss also vorher für jede Kohle auch ihr spezifischer Widerstand erfasst werden.

7. DER STAMPFCONTROLLER

Der Stampfcontroller ist eine Substeuerung, die ausschließlich zur Kontrolle des Stampfvorganges eingesetzt ist. Dieses Gerät ist bei einigen Maschinen der Fa. *Schunk* eingesetzt.

7.1 MOTIVATION

Die Problematik zu kurzer Lebensdauer der Schalter für das Stampfniveau war der auslösende Anstoß, über andere Möglichkeiten der Niveauabschaltung nachzudenken. Die verwendeten mechanischen Schalter waren oft schon nach wenigen Arbeitstagen zu ersetzen. Versuche, preisgünstigere Fabrikate anstelle der verwendeten einzusetzen, scheiterten an den hohen Anforderungen an die Wiederholgenauigkeit.

Versuchsobjekt für die Erprobung einer neuen Schaltung war der älteste Automat¹, der schon mit einigen Generationen von Steuerungen aus- und umgerüstet worden war, und der eigentlich schon seit einigen Jahren durch eine leistungsfähigere Maschine ersetzt werden sollte. Obwohl die Komplexität dieser Maschine die niedrigste ist, weil sie die geringste Anzahl an Bearbeitungsstationen aufweist, war auch hier die Funktionalität der verwendeten SPS für die Realisierung der geplanten Funktionen nicht ausreichend. Daher wurde eine kleine Kompaktsteuerung als externe Steuerung eingesetzt, die als Option auch die Möglichkeit zur schnellen² Verarbeitung von genau jenen zwei benötigten Eingangssignalen bot, wie sie im Modell für dem Stampfvorgang vorgestellt worden sind (vgl. Kap. 4). Ein weiterer Grund war die sogenannte Schlagzahlüberwachung, eine externe Zähler-schaltung für die zur Herstellung des Stampfkontaktes geplanten Schläge (mit Fehlermeldung bei deren Über- oder Unterschreitung), die definierte Ansteuerungssignale erfordert.

Nach der erfolgreichen Erprobung im Dauerbetrieb wurde die nächste Generation der Stampfcontroller durch zwei weitere Optionen ergänzt. Einerseits wurde sichergestellt, dass zum Zeitpunkt des Stampfbeginns immer ein voller Hub der durch den Drehschieber gesteuerten Stampfbewegung stattfindet. Andererseits wurde ein sogenannter Verdichtungsschlag als wählbarer zusätzlicher Schlag

¹ Von den im Werk Wien der Fa. *Schunk* vorhandenen Rundtischautomaten für die Herstellung von Stampfkontakten. Diese Maschine wurde 1977 in Dienst gestellt.

² Die Eingangsverzögerung lag bei ca. 2 Millisekunden.

eingeführt, wobei das Verdichten der obersten Lage des Pulvers mit nahezu keinem Pulverfluss bei dem letztem Schlag zur Verfestigung der Stampfung dient.

7.2 AUFGABEN

Der Stampfcontroller ist eine von den übrigen Steuerbaugruppen unabhängige Einheit. Ein Mikrocontroller ist direkt über freie Portadressen durch digitale Eingabe- bzw. Ausgabeanschlüsse mit der Stampfstation verbunden. Die Reaktionszeit der Schaltung ist durch die Dimensionierung der Bauteile auf ca. 1 ms festgelegt. Das Hauptprogramm ist ein Interpreter, der die Funktionalität einer SPS abbildet. Die Entwicklung der Mikrocontroller-Plattform und die wesentlichen Funktionen des Hauptprogramms sind in „Die Entwicklung einer speicherprogrammierbaren Steuerung“ beschrieben [Kuc98]. Das zugehörige SPS Programm³ ist in dem im Prozessor integrierten EEPROM abgelegt.

Eine detaillierte Beschreibung der Funktion des Stampfcontrollers und die Arbeitsschritte zur Installation ist in Anhang B zu finden.

7.3 PROBLEME BEI DER NACHRÜSTUNG BESTEHENDER ANLAGEN

Im Zuge der Umbauarbeiten war es notwendig, auch einige Eingriffe in die bestehende Steuerung vorzunehmen und zusätzliche Abfragen zu verdrahten. Bei einer Reihe von Anlagen war dies auch ohne Probleme möglich. Es gab jedoch auch einige Anlagen, bei denen, trotz sorgfältiger Ausführung der Arbeiten, die gewünschte Funktion nicht erreicht worden ist. Dazu werden in der Folge jene Einflüsse bewertet, welche die gewünschte Funktion ungünstig beeinflussen.

7.3.1 EINFLUSSGRÖßEN UND DEREN AUSWIRKUNGEN

Im Idealfall soll der Zylinder den Luftimpulsen synchron folgen. In der Realität existieren jedoch verschiedene verzögernde Einflüsse. Die Folge ist, dass die interne Abfrage, ob das Niveau erreicht ist, zu einem Zeitpunkt, bei dem der Stampfzylinder noch nicht oder nicht vollständig entlüftet ist, gestellt wird und sich daher der Stampfzylinder noch in seiner oberen Position oder gerade in der Abwärtsbewegung befindet.

³ Es existieren bereits mehrere Versionen des SPS Interpreters und des SPS Programms. Die zuletzt verwendeten Versionen sind „SWITCH.ASM“ für den Interpreter und „SPS_P03.EEP“ für die SPS. Die Version „SPS_P04.EEP“ ist eine spezielle Variante für bis zu drei Verdichtungsschlägen mit der in einer Maschine verwendeten Version „SPS_P04Y.EEP“. Die Version „SPS_P05.EEP“ ist eine noch nicht praktisch erprobte Variante.

Folgende Einflussgrößen sind beobachtbar:

- Drehschieber – Stampfzylinder: erst wenn genügender großer Druck im Zylinder aufgebaut ist, beginnt die Bewegung.
- Nicht beeinflussbar (weil konstruktionsbedingt): Öffnungszeit des Drehschiebers, Schließzeit des Drehschiebers.
- Nicht beeinflussbar (weil herstellungstechnisch bedingt): Stampfdruck
- Teilweise beeinflussbar: Reibungen des Stampfrohrs, Leichtgängigkeit vom Stampfzylinder (Wartungszustand) der Einrichtung
- Unrichtige Reihenfolge der Abfragezeitpunkte. (Muss richtig gestellt werden)
- Unrichtige Anordnung der Initiatoren (beispielsweise: Befestigungen für Initiatoren korrelieren nicht mit der Fräsung für die Luftimpulse im Drehschieber).

Daraus ergeben sich folgende Fehlerauswirkungen:

- Stampfen startet, wird jedoch vom Stampfcontroller nicht oder nicht rechtzeitig gestoppt. Ursache: der Schaltzeitpunkt für die Niveauabfrage und der Schaltzeitpunkt am Drehschieber werden nicht (oder nie) gleichzeitig abgefragt. Die Abschaltung erfolgt nur dann, wenn beide Abfragen innerhalb eines sehr engen Zeitfensters (wegen der Genauigkeit erforderlich) gleichzeitig erfolgen.
- Stampfen startet, wird jedoch vom Stampfcontroller sofort wieder gestoppt. Ursache: der Schaltzeitpunkt für die Niveauabfrage und der Schaltzeitpunkt am Drehschieber werden bereits beim Heben oder Senken des Stampfzylinders gleichzeitig abgefragt. Der Stampfcontroller erzeugt sofort die Fertigmeldung, der Stampfvorgang wird abgebrochen.

7.3.2 MECHANISCHE VERSCHIEBUNG DER ABFRAGEZEITPUNKTE

Im Zusammenhang mit einer unerwünschten Reaktion des Stampfcontrollers kann auch die Frage aufgeworfen werden, wie die Steuerung auf Verlängerung der Schaltfahnen für die Abtastpunkte reagiert. Dazu kann man feststellen, dass die Abfrage der Eingänge des Stampfcontrollers ausreichend schnell ist. Die Reaktionszeit liegt in der Größenordnung von einer Millisekunde und könnte auch durch Umdimensionierung⁴ der Bauteile weiter erhöht werden. Die mechanische Verlän-

⁴ Auf Basis der gleichen Mikrocontroller-Plattform wurde eine Überwachungseinrichtung für Drehzahldifferenzen konzipiert und realisiert, bei denen ein Zählengang mit einer Frequenz von 10 kHz abgetastet wird. Allerdings musste in diesem Fall das Programm in Maschinencode erstellt werden.

gerung der Schaltfahnen oder die Vergrößerung der Abtastpunkte bewirkt jedoch eine der neuen Größe der Punkte entsprechende Verschiebung der Schaltzeitpunkte nach, zeitlich gesehen, „früher“, da auf Grund der Drehbewegung der abfragende Initiator früher anspricht.

Die Notwendigkeit der Veränderung der Abfragezeitpunkte wird durch die folgenden Messungen an Stampfmaschinen gezeigt. Ausgangssituation war die Nachrüstung einiger Maschinen mit dem Stampfcontroller. Während Umbau und nachfolgende Funktionskontrolle bei einem Teil dieser Maschinen ohne Schwierigkeiten erfolgen konnte, blieb dieser bei wenigen Anlagen ohne die gewünschten Ergebnisse.

Bei der Maschine mit der Bezeichnung S6⁵ wurden mehrere Aufzeichnungen der Bewegungsabläufe vorgenommen. Zuerst wurde festgestellt, dass die Schaltungsreihenfolge der abfragenden Initiatoren unrichtig gewesen ist. Danach ergab die erste Aufzeichnung (Abb. 7.1) das folgende Bild:

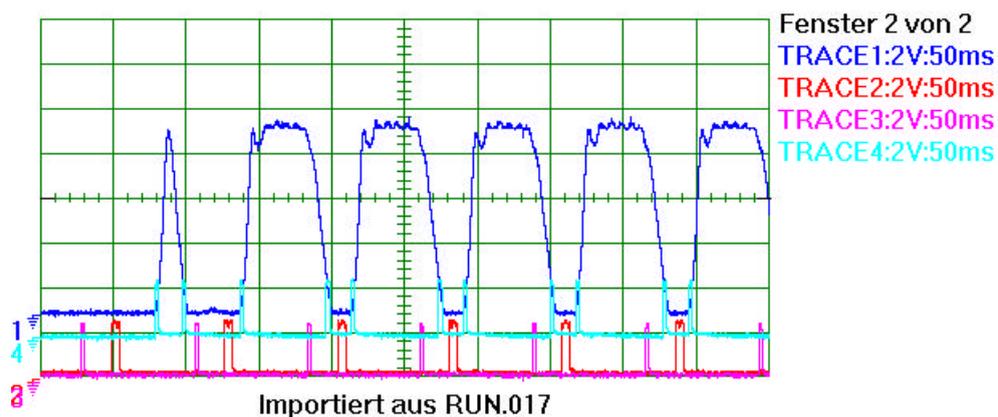


Abb. 7.1: Maschine S6, erstes Bild

In Abbildung 7.1 und den folgenden Bildern wurden die Signale, entsprechend den Kanälen des Oszillographen wie folgt aufgezeichnet:

- Kanal 1 (Trace 1, blau) stellt den Kolbenhub dar (analoge Messung der Hubhöhe optisch mit Analogausgangssignal, wobei die Hubhöhe für diese Aufzeichnungen nicht nachgemessen worden sind)
- Kanal 2 (Trace 2, rot) stellt den Startimpuls dar (digitaler Sensor)
- Kanal 3 (Trace 3, cyan) stellt den Stoppimpuls dar (digitaler Sensor)

⁵ Im Werk Gießen werden die Fertigungsbereiche "S" für Schichtkohle und "B" für Blockkohle unterschieden. Die Maschinen selbst sind jedoch gleichartig und könnten für alle Typen von Kohlebürsten ausgerüstet werden.

- Kanal 4 (Trace 4, h'grün) stellt den Niveauimpuls dar (digitaler Sensor)
- horizontale Zeitachse 50 ms, entspricht einer Teilungseinheit

Es fällt auf, dass der erste Schlag nicht vollständig ausgeführt, sondern vorzeitig durch den Drehschieber abgebrochen wird. Das bedeutet, dass die Position des Initiators für den Startimpuls bezogen auf die Bewegung unrichtig liegt. Das Bild zeigt, dass bei dieser Aufzeichnung die Freigabe zu einem Zeitpunkt erfolgt, wenn der Luftdurchlass des Drehschiebers bereits voll geöffnet ist.

Nachdem in diesem Fall die Untersuchung Schritt für Schritt durchgeführt worden ist, werden die anderen Signale erst später diskutiert. Im ersten Schritt wurden die Signale der Sensoren wie folgt vertauscht:

- Stop → Start
- Verdichten → Stop
- Start → Verdichten

Danach wurde eine neuerliche Aufzeichnung vorgenommen (Abb. 7.2).

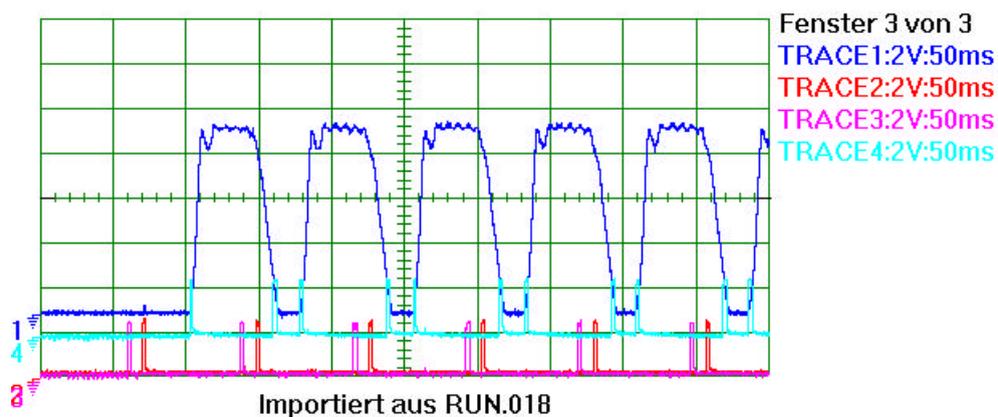


Abb. 7.2: Maschine S6, zweites Bild

Abb. 7.2 zeigt den Ablauf der Bewegungen von Maschine S6 nach dem zyklischen Vertauschen der Sensoren. Die oben festgelegte Reihenfolge der Kanäle des Oszilloskopes wurde dabei beibehalten. Die Abbildung zeigt nun, dass der erste Schlag vollständig ist, dass jedoch der Abstand der Schaltpunkte Start zu Stop zu groß ist und etwa 300° beträgt. Auf Grund des Umstandes, dass die Einstellmöglichkeit der Schaltnocken auf Grund der konstruktiven Form der Trägerscheibe nur über einen Winkelbereich von 180° möglich ist, wurde das Versetzen der Schaltnocke um ca. 90° durch mechanisches Versetzen der Scheibe mit gleichzeitigem Vertauschen der Schaltpunkte für Stopp und Verdichten erreicht. Das Ergebnis dieser Maßnahme zeigt die Abbildung 7.3.

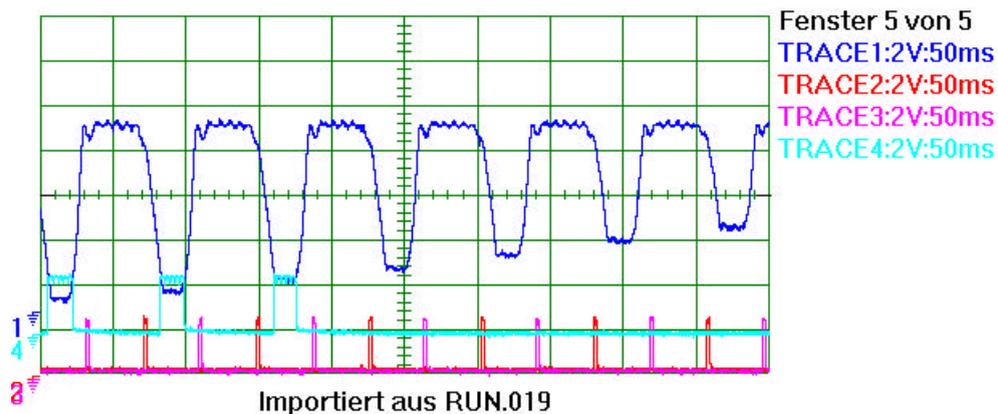


Abb. 7.3: Maschine S6, drittes Bild

Abbildung 7.3 zeigt jenen Ausschnitt des Bewegungsablaufes, der das Ende des Stampfvorganges zeigen soll. Ab hier liegt das Interesse an der Untersuchung der Generierung des "Stampfen Ende" Signals. Das mit Trace 4 abgefragte Signal, das das zu erreichende Niveau der Stampfung zeigt, wird ab der Mitte des Bildes nicht mehr angesprochen. Das bedeutet, dass ab diesem Zeitpunkt die Bohrung bereits gefüllt ist und dass die weitere Abwärtsbewegung des Stampfzylinders durch die gefüllte Bohrung verhindert wird. Zu diesem Zeitpunkt sollte der Stampfvorgang bereits abgebrochen sein. Es ist jedoch auch zu sehen, dass der Stopp Schalter des Drehschiebers zu diesem Zeitpunkt nicht anspricht und daher die gewünschte Abschaltung nicht erfolgt.

Das Ziel, die Funktion der untersuchten Maschine sicherzustellen, wurde nach einigen Zwischenschritten schließlich erreicht. Zeitaufwendig dabei war das Suchen der Schaltzeitpunkte und der Umstand, dass für diese Abfragepunkte keine einfache Einstellmöglichkeit vorgesehen worden war. Daher bedeutete ein Verstellvorgang die Demontage und Montage des Drehschiebers bzw. der darauf montierten Trägerscheiben.

Wie auch schon weiter oben ausgeführt, sind die Schaltzeitpunkte für die Abschaltung, also Stopp und Verdichten, in ihrer Einstellung kritisch. Der Schaltzeitpunkt für Start darf nur nicht erfolgen, wie es im oben angeführten Fall gezeigt worden ist, wenn der Drehschieber geöffnet ist. Ideal liegt dieser Zeitpunkt, wenn er kurz vor dem Öffnen des Drehschiebers erfolgt.

7.3.3 PNEUMATISCHE VERSCHIEBUNG DER ABFRAGEZEITPUNKTE

Als eine weitere Maßnahme wurde bei der Untersuchung der Reaktion des Stampfcontrollers auf die angebotenen Eingangssignale der Entlüftungsvorgang des Stampfzylinders in die Überlegungen mit einbezogen. Untersucht wurde die Maschine S9, bei der ähnliche Messungen und vorbereitende Maßnahmen vorgenommen worden sind.

In den folgenden Abbildungen 7.4 und 7.5 sind jeweils das Ende eines Stampfvorganges aufgezeichnet.

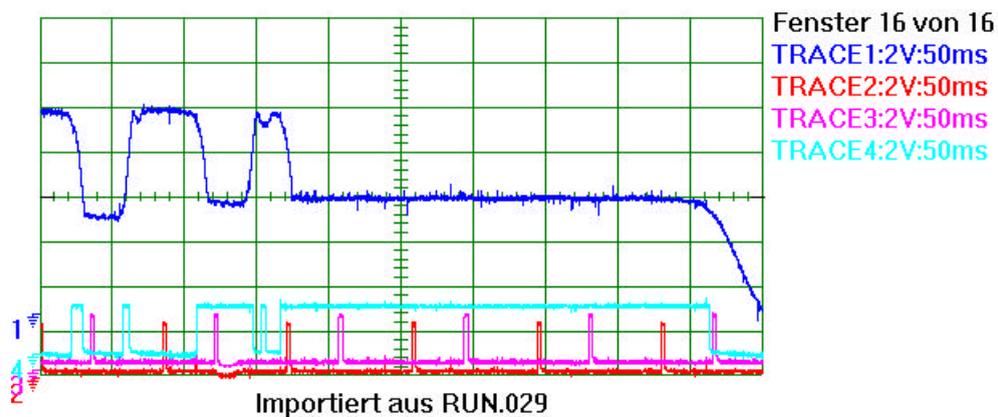


Abb. 7.4: Maschine S9, Ende des Stampfvorganges

In Abbildung 7.4 ist deutlich zu erkennen, dass die Abfrage für „Stampfen Ende“ mit der Beendigung der Abwärtsbewegung des Stampfzylinders zusammenfällt. Besser wäre es, wenn dieser Punkt zeitlich gesehen später situiert wird, etwa dort wo die nächste Hubbewegung einsetzen sollte. Um dies zu Erreichen wurde anstelle des vorhandenen Schlauches (6/4)⁶, der den Drehschieber mit dem Stampfzylinder verbindet, ein neuer Schlauch größeren Querschnitts (8/6) verlegt, wobei auch die Länge des Schlauches so knapp wie möglich bemessen worden ist. Abbildung 7.5 zeigt das Ergebnis.

Gegenüber der vorhergehenden Abbildung ist in Abb. 7.5 die Abfrage für Stampfen Ende nach, zeitlich gesehen, später verschoben. Der Zeitunterschied kann am horizontalen Raster abgelesen werden. In obigen Beispiel beträgt die Zeitverschiebung rund 10 ms bei einer Frequenz von 11,8 Hz. Umgerechnet entspricht die Frequenz einer Taktzeit von 84,7 ms für eine volle Umdrehung, die Zeitver-

⁶ Der Verbindungsschlauch vom Drehschieber zum Stampfzylinder hat eine Länge von ca. 0,8 m. Die Bezeichnung 6/4 bezeichnet den Außen- und den Innendurchmesser in Millimetern.

schiebung kann daher als eine Verdrehung des Drehschieberwinkels von etwa 28 Grad aufgefasst werden.

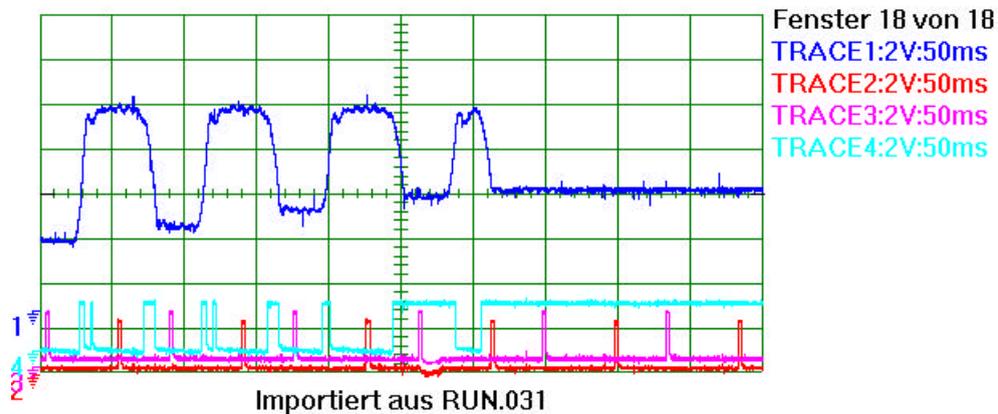


Abb. 7.5: Maschine S9, Ende des Stampfvorganges, geänderter Luftschlauch

Diese Maßnahme zeigt den Einfluss der Luftleitung auf das System. Durch den größeren Querschnitt der Leitung kann die Luftmenge schneller den Zylinder be- und entlüften, daher wird die Bewegung früher gestartet und beendet.

7.3.4 KONSTRUKTIVE MAßNAHEN

Aus den untersuchten Vorgängen und Zeitabläufen konnte folgende konstruktive Maßnahme zur Problemlösung vorgeschlagen werden. Es steht fest, dass die Stampfbewegung der Drehschieberbewegung nacheilt und dass der Bewegungsablauf dem Drehschieber genau folgt.

Um selbst bei stark verzögernden Einflüssen die gewünschte Funktion sicherzustellen, genügt es, die Schaltzeitpunkte für die Abschaltung (Stampfen Ende, Verdichten) insoweit veränderbar zu machen, dass die Befestigung der Initiatoren zwar zueinander in einem festen Verhältnis, entsprechend der Fräsungen im Drehschieber, stehen, insgesamt aber in einem gewissen Einstellbereich verdrehbar angeordnet sind.

Für jenen Fall, dass die Fräsungen insgesamt zur Stampfbewegung verschoben sind, muss auch der Schaltzeitpunkt für „Ventil Auf“ einstellbar sein.

7.3.5 EINSTELLPUNKTE

Gegenüber dem Drehschieber, der jedenfalls auf Grund seiner Konstruktion ein von der Drehzahl abhängiges Öffnungs- und Schließverhalten zeigt, besitzt das in Serie geschaltete Freigabeventil ein festes Zeitverhalten. Typische Zeitverzögerungen für Magnetventile liegen je nach Bauart innerhalb weniger Millisekunden.

Der funktionell günstigste Zeitpunkt der Abfrage für die Abschaltung des Stampfvorganges liegt möglichst knapp vor dem Beginn der Aufwärtsbewegung.

Für die Suche nach jener Einstellung, die für die Abschaltung benötigt wird, kann wie folgt erfolgen:

- Man belüftet den Drehschieber bei abgeschaltetem Antrieb.
- Man verdreht den Drehschieber mit der Hand bis bei der Austrittsöffnung für den Stampfzylinder Luftaustritt feststellbar ist. Durch mehrmaliges Vor- und Zurückdrehen kann dieser Punkt genau lokalisiert werden.
- Korrespondierend zu dieser Position wird der Schalterpunkt für die Abschaltung eingestellt.

Der Schalterpunkt für die Einschaltung des Ventils kann ohne Beeinträchtigung der Funktion über einen größeren Einstellbereich gewählt werden. Dieser Bereich erstreckt sich über die gesamte Entlüftungsphase des Drehschiebers.

Weiter oben wurde gezeigt, dass das Schalten während der Belüftung zu dem in Abbildung 7.1 gezeigten Bewegungsablauf für den ersten Schlag führen kann. Wäre dieser Zeitpunkt nur wenig später gewählt worden, hätte keine Bewegung mehr stattfinden können. Dieser Punkt kann als der, zeitlich gesehen, frühestmögliche Schaltzeitpunkt definiert werden. Bezogen auf eine Zeitachse liegt dieser Punkt vor dem oben definierten Abschaltzeitpunkt. In Abbildung 7.6 sind diese Schaltzeitpunkte und der Bereich für die Positionierung des Startsignals schematisch dargestellt.

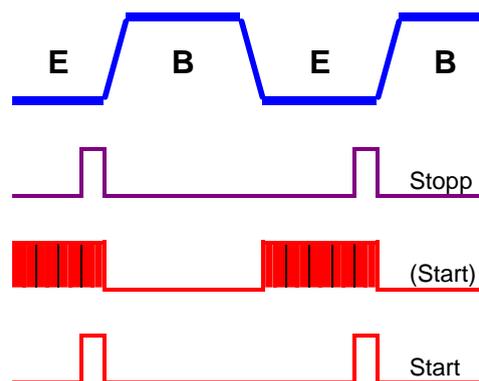


Abb. 7.6: Lage der Abfragezeitpunkte

Abbildung 7.6 zeigt den Bewegungsablauf des Zylinders mit den Bereichen Entlüftung (E) und Belüftung (B). Die Lage für das Stampfen Ende Signal (Stopp) ist nach den vorbergehenden Überlegungen fixiert. Der Bereich für das Startsignal ist darunter dargestellt. Idealerweise sollte jedoch das Startsignal zum spätesten möglichen Zeitpunkt abgefragt werden, weil, wenn die Anforderung an den

Stampfcontroller für den Beginn des Stampfens erst nach dem tatsächlich eingestellten Abfragezeitpunkt erfolgt, der Drehschieber solange weitergedreht werden muss, bis dieser Abfragepunkt neuerlich erreicht worden ist⁷.

Auf Grund der üblicherweise höheren Verzögerung beim Öffnen eines Ventils gegenüber seiner Schließzeit werden diese Punkte nicht, wie dargestellt, genau fluchten, sondern der Startzeitpunkt müsste etwas voreilen. Diese Variante wurde bisher noch nicht überprüft.

Der Schaltzeitpunkt für das Verdichten der Stampfung muss innerhalb der Belüftungsphase des Stampfzylinders liegen. Weil mit Erkennen dieses Schaltpunktes die Belüftung durch Abschaltung des Ventils sofort unterbrochen wird, wird auch der Zufluss von Stampfpulver vorzeitig abgebrochen. (Ursprünglich überlegt war, diesen Zeitpunkt so zu legen, wie es der abgebrochene Bewegungsablauf in Abb. 7.1 zeigt, wobei dort nahezu kein Pulver mehr nachrieseln kann. In der Praxis existieren jedoch auch andere Zeitverläufe, die einen geringen Pulverfluss zulassen⁸).

7.4 WEITERE ANWENDUNGEN DER MIKROCONTROLLER PLATTFORM

Die Kombination der Drehzahlregelung mit Frequenzumformer und Drehschieber ist technisch aufwendig, lässt jedoch eine stufenlose Veränderung der Schlagfrequenz zu. Die Frage, ob eine stufenlose Regelung tatsächlich benötigt wird, kann auch vom Hersteller der Kohlebürsten nicht eindeutig beantwortet werden. Es wurde im Zusammenhang damit schon überlegt, diese Möglichkeit zwar beizubehalten und in Fertigungsvorschriften festzulegen, aber das nicht einfach kontrollierbare Nachjustieren an der Maschine während der Fertigung durch das Bedienpersonal zu erschweren. Gedacht wurde dabei an Schaltstufen, die mit versperrbaren Wahlschaltern festgelegt sind.

7.4.1 LUFTIMPULSERZEUGUNG MIT EINEM VENTIL

Im vorher vorgestellten Modell (Kapitel 4, Abb. 4.5) wurde der Drehschieber einfach als ein 2/3 Wege Magnetventil dargestellt. Herstellerangaben der Fa.

⁷ Die Latenzzeit des Drehschiebers soll so klein wie möglich sein.

⁸ Anzunehmen ist, dass die größere Öffnungszeit nur deshalb zustande gekommen ist, weil die Verstellung der Schaltpunkte bedingt durch die festen Schaltnocken nicht einfach möglich ist. Bezüglich der erzielten Ergebnisse liegen jedoch keine Beobachtungen oder Messungen vor, die zu eine Veränderung veranlasst hätten. (Mögliche Varianten des Verdichtungsschlages wurden im Detail noch nicht untersucht).

Festo zeigten, dass für derartige Ventile eine mechanische Lebensdauer von bis zu 30 Millionen Schaltspielen angegeben werden. Auf Grund einer einfachen Berechnung unter der Annahme, ein Stampfkontakt benötige bei der Herstellung durchschnittlich 10 Stampfhübe, steht fest, dass bei rund 10.000 pro Doppelschicht erzeugten Stampfkontakten ein Ventil wenigstens ein Jahr lang hält, wenn es direkt zur Impulserzeugung der Druckluftimpulse herangezogen wird.

Zur Ansteuerung des Ventils wurde die für den Stampfcontroller verwendete Mikrocontroller Plattform eingesetzt, wobei für die Anregung der Spule eine hochgenaue Impuls- Pausenfunktion als Programmteil implementiert worden ist. Zusätzlich wurde für den Versuch eine Eingabemöglichkeit für digital wählbare Einstellungen von Impuls- und Pausenzeit geschaffen. Neben der Übernahme und der Verarbeitung der Eingabewerten übernahm auch der Mikrocontroller die Auswertung des Stampfniveaus.

Zweck des Versuches war es, festzustellen ob der Drehschieber durch eine derartige Anordnung ersetzt werden kann und weiter, ob das Stampfergebnis den Ansprüchen der Fertigung genügt.

Zur Kontrolle wurde mittels der bereits bekannten optischen Wegmesseinrichtung bestehend aus Sensor und Spiegel die gesamte Bewegung aufgezeichnet. Für die Einstellstufen des quarzgenauen Zeitrasters für Einschaltzeit (Impulszeit) und Ausschaltzeit (Pausezeit) wurde als Schrittweite 5 ms gewählt, wodurch Zeiten und Pausen in Schritten im Bereich von 0 bis 75 ms wählbar waren. In Abbildung 7.7 wird die Versuchsschaltung gezeigt.



Abb. 7.7: Versuchsschaltung 1 für Stampfen ohne Drehschieber

Abbildung 7.7 zeigt den Mikrocontroller mit den Schaltern für die Zeiteinstellungen. Für die Zeiteinstellung sind die drei Dekadenschalter vorgesehen, deren Einstellwerte jeweils einmal vor dem Start des Stampfvorganges eingelesen werden. Der zusätzliche Drehschalter ist für weitere Einstellungen, insbesondere für Programmvarianten vorgesehen. Der Stecker dient als Anschlussmöglichkeit für Ausgangssignal des Ventilzustandes (Ein/Aus) zur Darstellung am Oszillographen.

Obwohl sich bei der Versuchsdurchführung rasch herausgestellt hat, dass das verwendete Ventil⁹ nicht ideal für diese Versuche geeignet war, weil das Entlüften des Zylinders die maximal einstellbare Zeit der Versuchsschaltung in Anspruch genommen hat, wurden brauchbare Kohlebürsten hergestellt. Ein weiterer Nachteil dieses Ventils waren seine Schaltverzögerungen beim Ein- bzw. Ausschalten, die laut Datenblatt rund 7 ms betragen. Eine Aufzeichnung des Stampfvorganges ist in Abbildung 7.8 dargestellt.

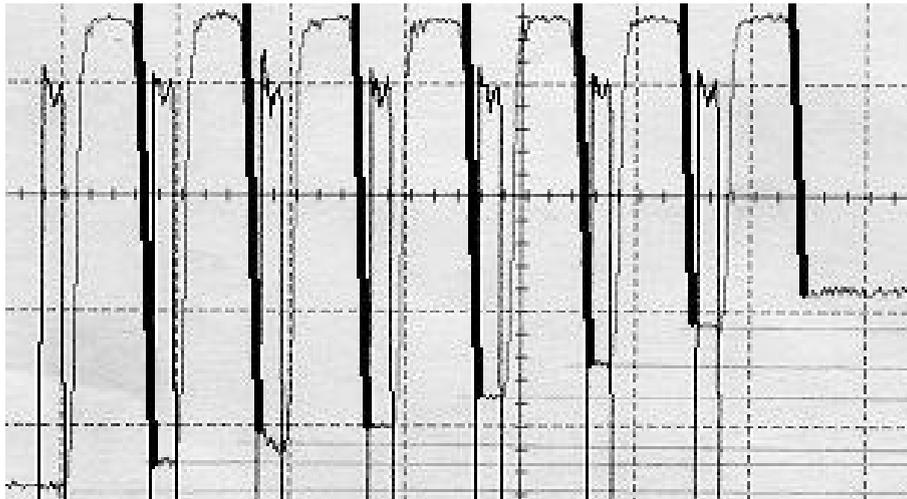


Abb. 7.8: Ausschnitt des Bewegungsablaufes beim Stampfvorgang

Abbildung 7.8 zeigt den Ausschnitt eines Bewegungsablaufes beim Stampfvorgang. Die Hubhöhe des Stampfröhrchens betrug bei dieser Messung 8 mm, die Füllhöhe 3,5 mm. Für die Zeiteinstellung (der Zeitraster entspricht 100 ms) wurde als Impulsdauer 20 ms und als Pausenzeit 75 ms gewählt. Die Schlagfrequenz errechnet sich demnach zu 10,5 Hz. Die stärker hervorgehobenen Linien verdeutlichen die Auftreffgeschwindigkeit auf das Pulver, wobei die Parallelität der Linien, d.h. gleiche Geschwindigkeiten, hervorzuheben ist. Jenes Signal, das durch die senkrechten und der horizontal ausgezackten Linien dargestellt ist, stellt die gemessene Ventilspannung dar. Die Abbildung 7.9 zeigt die Aufzeichnung eines Schlages, der mit einem Zeitraster von 20 ms aufgezeichnet worden ist.

⁹ Fabrikat *Festo*, Type MCH 3/8. Das Ventil wurde aus Kostengründen aus dem Ersatzteilverrat ausgewählt, wobei jenes mit dem größten Luftquerschnitt verwendet worden ist.

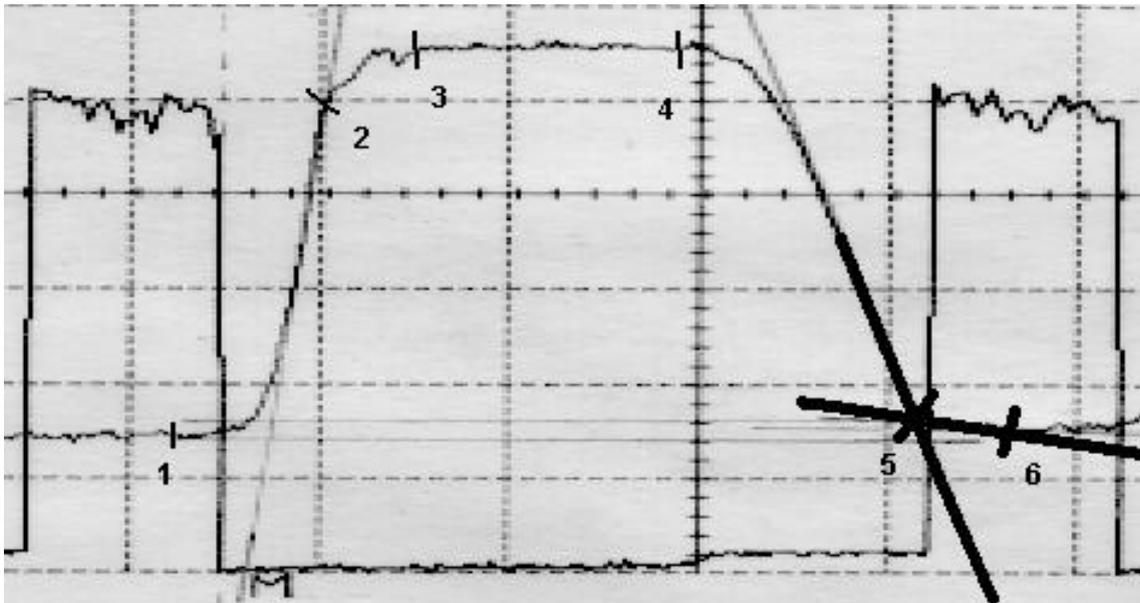


Abb. 7.9: Ausschnitt einer Bewegung beim Stampfvorgang

In der Abbildung 7.9 sind die Bewegungsabschnitte mit Ziffern bezeichnet. Die nachfolgenden ungefähren Zeiten sind aus der Zeichnung abgelesen worden¹⁰. Der Anstieg der Bewegung beginnt in Punkt 1, ca. 16 ms nach den Einschalten des Ventils, und erreicht im Punkt 2 seine höchste Geschwindigkeit. Dort wird die Bewegung durch die Anschlagdämpfung mit einem kleinen Rückprall bis zum Punkt 3 abgebremst. Die Abwärtsbewegung beginnt im Punkt 4, ca. 48 ms nachdem das Ventil abgeschaltet worden ist. Im Punkt 5 trifft das Stampfröhrchen auf das Pulver und verdichtet es bis zum Punkt 6. Die Fallbewegung dauert in dieser Aufzeichnung etwa 25 ms. Die hier abgelesenen Werte stimmen gut mit den vorher¹¹ berechneten Werten überein. Der Verdichtungsprozess selbst dauert hier ca. 9 ms.

Anzumerken ist noch, dass vor dem Versuch durchschnittlich sieben Schläge zum Erreichen der gleichen Qualität des Stampfkongaktes benötigt worden sind, die allerdings mit einer etwas höheren Schlagfrequenz (11,0 Hz) erzeugt worden sind. Der Zeitvorteil betrug daher nur etwa 67 ms, wobei die oben erwähnte Ventilschaltzeit (7 ms) durch die Verwendung entsprechender Ventile zusätzlich bei jeder Bewegung eingespart werden kann. Es ist nicht unrealistisch anzunehmen, dass auf Grund dieser Messungen Schlagfrequenzen um 15 Hz erreichbar sind.

¹⁰ Ein Teilstrich des durchgehenden horizontalen Maßstabes bedeutet in dieser Aufzeichnung eine Zeitdauer von 4 ms.

¹¹ Im Kapitel 5.

Zur Erzeugung des Signals für das Ende des Stampfvorganges ist anzumerken, dass im Gegensatz zum Stampfcontroller beim Erreichen des Niveaus einfach keine weiteren Impulse ausgegeben werden. Das Ende Signal wird genau zu jenem Zeitpunkt ermittelt, wenn der Niveauschalter angesprochen hat und die Pausenzeit beendet worden ist.

Bei der Erprobung der Schaltung wurden auch Versuche gemacht, bei denen der Stampfdruck gegenüber dem normalerweise verwendeten Druck um 2 bar variiert worden ist. Insgesamt waren, auch auf Grund des eingeschränkten Einstellbereiches für die Entlüftungszeit, keine neuen Erkenntnisse zu gewinnen.

Die Grenzfrequenz liegt bei dieser Versuchsanordnung bei etwa 10 Hz. Bestimmend dafür ist das Ventil, dass die ausströmende Luft in seiner Menge beschränkt und damit die Zeit für den Entlüftungsvorgang vorgibt. Genau dieser Umstand hat es bei einer nach dem vorgestellten Prinzip ausgerüsteten Versuchsmaschine notwendig gemacht, zwei Ventile parallel zu schalten. Die Möglichkeit, die Entlüftungszeit durch stärkere Federn zu variieren, ist dabei unberücksichtigt geblieben

7.4.2 VERSUCHSVARIANTEN

Die als Niveau bezeichnete Stampfhöhe eines Stampfkontaktes soll möglichst genau an den Bohrlochrand anschließen. Da das Bohrloch durch den aufgesetzten Pulvertrichter nach oben verlängert wird, kann höher als gewünscht gestampft werden. Das überschüssige Pulver bröseln dann beim Bewegen des Kabel mit der Zeit ab und die später angebrachte Versiegelung geht verloren. Darum wird auf die Einhaltung der Stampfhöhe großer Wert gelegt.

Bei einem Versuch, die Impulszeit zu erhöhen wurde die folgende Aufzeichnung des Bewegungsablaufes vorgenommen (Abbildung 7.10).

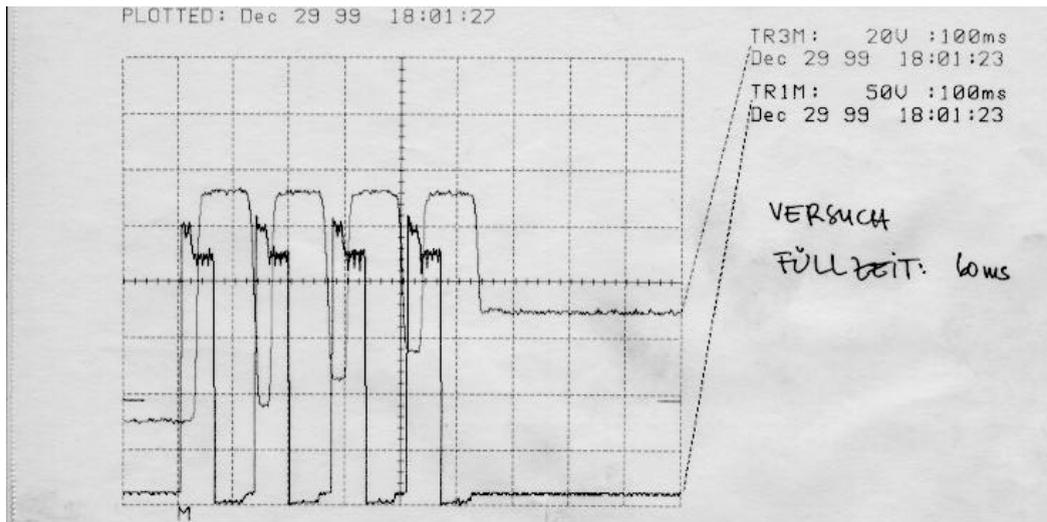


Abb. 7.10: Versuchsstempfung mit langer Füllzeit

Bei diesem Versuch sind in Abb. 7.10 vier Stampfhübe erkennbar. Wiederholte Stampfungen zeigten, dass die Füllhöhe genau einstellbar war. Kritisch ist jedoch der Umstand, dass hier zum Zeitpunkt des Einschaltens des Ventils die Fallbewegung nicht bei jedem Schlag vollständig abgeschlossen ist.

Um die Einstellmöglichkeit der Versuchsschaltung zu verbessern, wurden folgende Ergebnisse der Messungen herangezogen:

- Die maximal mögliche Einstellung der Pausenzeit ist mit 75 ms zu knapp. Der Zeitraster für die Einstellung in Schritten von 5 ms ist zumindest für weitere Versuche ausreichend. In der nächsten Programmvariante wird eine Fixzeit von 20 ms als Offset vorgesehen.
- Unter 20 ms Impulsdauer für den Stampfimpuls war keine nennenswerte Reaktion des Magnetventils, auch nicht bei der versuchsweise erfolgten Erhöhung des anspeisenden Luftdruckes, feststellbar. Der Zeitraster für die Einstellung in Schritten von 5 ms ist für weitere Versuche nicht fein genug. In der nächsten Programmvariante wird eine Fixzeit von 20 ms als Offset vorgesehen und der Zeitraster auf 1 ms verkürzt.
- Als Zusatzfunktion wird vorgesehen, die Impulszeit zu berechnen. Dazu wird, bei entsprechender Programmwahl, vorgesehen, bei jedem Stampfhub die Impulszeit um eine feste Zeit (hier 1 ms) zu vermindern.

Für diese Schaltung liegen noch keine Ergebnisse vor, denn sie wurde noch nicht getestet.

7.4.3 ZIELE EINES NEUEN KONZEPTES

Eine weitere Versuchsschaltung wurde für ein Schnellschaltventil der Fa. *Hoerbiger* entwickelt. Laut dem Datenblatt für die Serie HX751 bietet dieses 2/3 Wegeventil unter anderen neben einer Lebensdauer von über 500 Millionen Schaltspielen Schaltverzögerungen für das Ein- bzw. Ausschalten von kleiner 2 ms.

Zugrundegelegt wurden unter anderen folgende Überlegungen:

Ein Hauptanliegen der Hersteller von Kohlebürsten sind wiederholgenaue Parameter, die in Herstellungsvorschriften festgehalten sind. Damit sind die Ziele eines neuen Konzeptes für den Stampfcontroller einfach zu formulieren:

- Wählbare Schlagfrequenzen. Die stufenlose Einstellung dieser steht dabei nicht im Vordergrund, sondern wählbare Schaltstufen mit festgelegten Impuls- und Pausenzeiten.
- Exakte Abschaltung beim Erreichen der Stampfhöhe. Die Einflussgrößen Pulvermenge und eventuelle Unregelmäßigkeiten beim Pulverfluss sind nicht einfach beherrschbar.

Das erste Ziel, die stufenweise Vorwahl der Schlagfrequenz, kann mit der in Abbildung 7.11 gezeigten Variante des Stampfcontrollers realisiert werden.

Abbildung 7.11 zeigt den Versuchsaufbau, der mit dem weiter oben erwähnten Schnellschaltventil in Betrieb genommen worden ist. Die oberhalb des Prozessors (Pfeile) aufgesteckten Drehschalter erlaubten die Einstellung von 16 Schlagfrequenzen, die zunächst für einen Bereich zwischen 8 und 16 Schlägen pro Sekunde vorgesehen worden sind. Der zweite Drehschalter sollte die Aufgabe übernehmen, den Einfluss auf das Entlüftungsverhalten durch die Durchflussbegrenzung des Ventilquerschnittes für unterschiedliche Federkräfte auszugleichen. Weil Federn mit einer größeren Federkonstante für eine schnellere Entlüftung sorgen und somit eine höhere Auftreffgeschwindigkeit ermöglichen, kann die Zeitdifferenz von der benötigten Zeit für die Entlüftung abgezogen werden. Dadurch wird indirekt die Frequenz bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen erhöht. Die erzielte Zeitersparnis erhöht, wenn auch nur geringfügig, die Maschinenleistung.

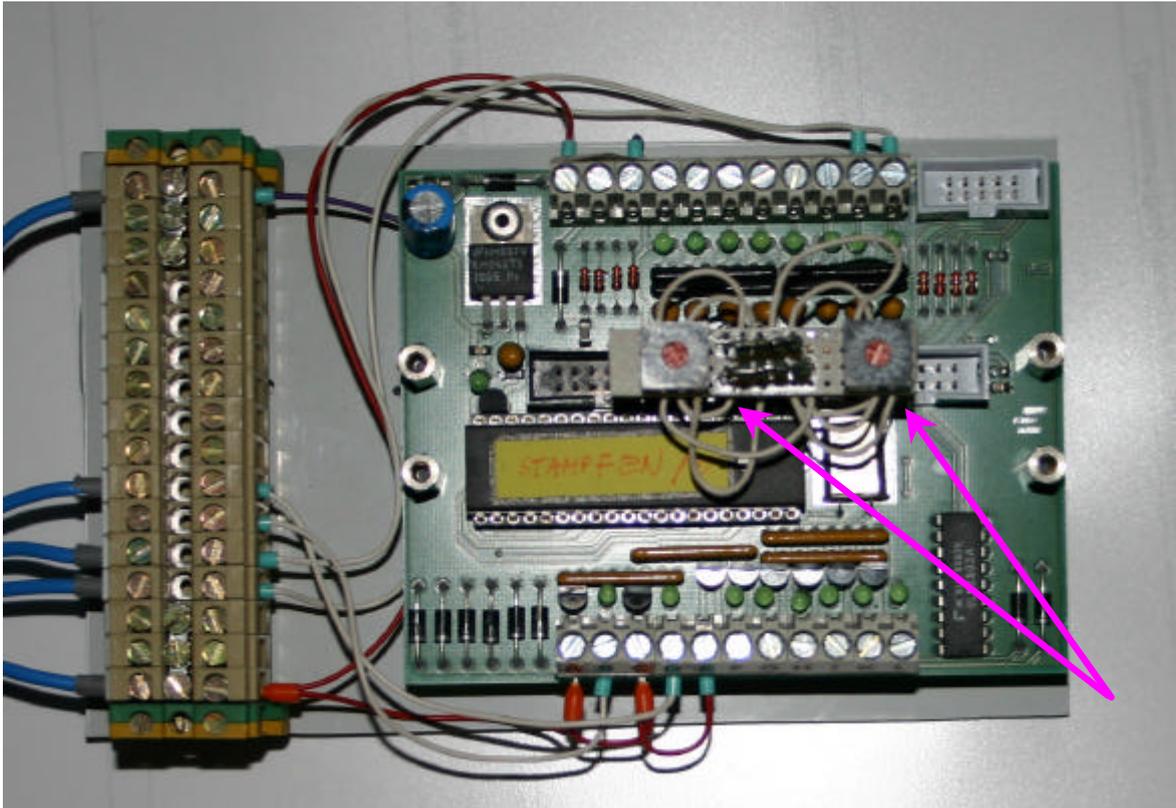


Abb. 7.11: Versuchsschaltung Stampfcontroller neu

Nach der Erprobung war geplant, in einem weiteren Schritt die exakte Abschaltung bei Erreichen der Stampfhöhe zu gewährleisten. Die Idee dazu war, durch eine exakte Zeitmessung und rechnerische Auswertung im Mikrocontroller die Dosierung der Pulvermenge durch Variation der Füllzeit zu beeinflussen. Zugrundegelegt wurde dabei die Tatsache, dass die Füllhöhe bei jedem Schlag gegenüber der vorhergehenden geringfügig anwächst.

Weiters zeigten die Messungen aber, dass auch die Auftreffgeschwindigkeit auf das Stampfpulver Streuungen unterworfen ist, also dass auch die von dieser Geschwindigkeit abhängige Stampfenergie Einfluss auf die festgestellte Höhendifferenz hat. Diesem Einfluss kann nur mit einer Geschwindigkeitsberechnung begegnet werden, wobei zusätzliche Sensoren zur Erfassung der benötigten Daten erforderlich wären. Dieser Gedanke wurde aus Kostengründen nicht weiter in Betracht gezogen.

Auch unterschiedliches Fließverhalten des Stampfpulvers ist als Ursache für Füllhöhenunterschiede denkbar. Dieser Einfluss kann mit einer Höhenmessung erfasst werden, wozu ebenfalls zusätzliche Sensoren erforderlich wären. Auch

dieser Gedanke wurde nicht berücksichtigt, weil bei gleichbleibender Qualität des Pulvers die zu erwartenden Unterschiede als eher geringfügig anzunehmen sind.

Auch weil festgestellt worden ist, dass sich die Füllzeiten mit jedem Schlag geringfügig verlängern, sollte dieser Umstand Basis für die Berechnung werden. Diese Feststellung der Verlängerung der Füllzeiten lässt sich auch aus den vorher für den Drehschieber erfolgten Messungen und zugehörigen Abbildungen ablesen, obwohl sie dort nicht explizit ausgewertet worden sind (vgl. Kap. 5).

Die mit dem Schnellschaltventil durchgeführten Versuche scheiterten. Grund dafür war weder die Schaltung noch das Ventil selbst, sondern die besonderen Umstände¹² und der Zeitdruck bei der Versuchsdurchführung. Die Versuche wurden abgebrochen, ohne sie zu Ende führen zu können.

7.5 ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz des Stampfcontrollers hat eine Steigerung der Qualität der erzeugten Stampfkontakte durch das Sicherstellen von vollständigen Stampfhüben gebracht. Auch die, durch die Zeitabschaltung bedingte, Unsicherheit der Höhenkontrolle bei einer Stampfung konnte ausgeschlossen werden. Das zählbare Ergebnis hat sich in der Einengung des Toleranzfensters für die Kontrollzählung¹³ der Stampfhübe auf \pm einen Schlag bemerkbar gemacht.

Die nachträgliche Ausrüstung bestehender Maschinen hat gezeigt, dass bei einem Umbau Voraussetzungen zur Gewährleistung der gewünschten Funktion erfüllt sein müssen. Folgende Maßnahmen werden vorgeschlagen:

Laut Angaben des Herstellers der Drehschieber ist, zumindest laut den Fertigungsunterlagen, die Position jener Scheibe, auf denen die Schaltnocken für die Abfragen der Stellungen des Drehschiebers montiert sind, bezogen auf die benötigten Abfragezeitpunkte fest durch die Lage einer Passfeder gegeben. Dabei wird vorausgesetzt, dass bei der Fertigung die relative Lage der Passfeder

¹² Teile der Versuchsmaschine wurden dringend benötigt und verkauft. Der Versuchsaufbau konnte danach nicht wieder zusammengestellt werden.

¹³ Die Schlagzahlzählung ist ein Ausscheidungskriterium für zuwenig oder zuviel gestampfte Kohlebürsten. Sind bei ersteren eine zu geringe Festigkeit oder ein zu hoher Übergangswiderstand zu erwarten, sind bei letzteren Risse in einer Kohle oder andere schädliche Umstände möglich.

gegenüber den Ausfräsungen für die Luftkanäle bei allen gefertigten Drehschiebern der Zeichnung entsprechend berücksichtigt worden ist¹⁴.

Zur Überprüfung muss bei den bestehenden Maschinen zunächst festgestellt werden, ob die Schaltzeitpunkte der Initiatoren mit den benötigten Zeitpunkten tatsächlich übereinstimmen. Als Methode wird das Verdrehen der Scheibe, auf welcher die Schaltnocken angeordnet sind, vorgeschlagen, so dass bei der Montage die Abfragezeitpunkte korrigiert werden können (z.B. durch das Anbringen einer zusätzlichen Nut für die Passfeder).

Zur Feststellung der Abfragezeitpunkte wird der Drehschieber direkt mit Luft versorgt. Durch das Drehen der Scheibe mit der Hand jeweils der Winkel bestimmt, z.B. bezogen auf den ersten Schaltzeitpunkt „Ventil auf“.

Die gefundenen Schaltzeitpunkte liegen in einem festen Verhältnis zueinander. Zur Feinabstimmung sind Schaltnocken wünschenswert, die sich innerhalb bestimmter Grenzen einstellen lassen. Dazu ist eine Änderung der Konstruktion erforderlich.

Weiters ist zu beachten, dass ein Magnetventil eine gewisse Zeit benötigt, um voll zu öffnen. Vorausgesetzt wurden bei der Entwicklung des Stampfcontrollers ausreichend schnell schaltende Ventile. Daher müssen auch die Schaltzeiten der Ventile überprüft werden. Es wäre daher zu empfehlen, Ventile mit externer Steuerhilfsluft zu verwenden, da zum einen ein relativ niedriger Stampfdruck einstellbar ist (der möglicherweise unterhalb der Ansprechschwelle für die Schaltung des Ventils liegt) und zum anderen der Druck während jeder Entlüftungsphase des Drehschiebers zusätzlich abfällt und damit das Schaltverhalten des Ventils beeinflussen kann.

Ein neues Konzept für den Stampfcontroller wurde vorgestellt. In der einfacheren Variante werden wählbare Schlagfrequenzen vorgeschlagen, bei denen innerhalb der vorzusehenden Stufen individuelle Feinabstimmungen der Stampfmaschinen

¹⁴ Erst im Zuge dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass bis etwa 1995 bei der Herstellung der Drehschieber auf Grund der damaligen maschinellen Ausrüstung des Herstellers nicht besonders genau auf die Teilwinkel und andere wichtige Details geachtet wurde bzw. werden konnte. Erst durch die Verwendung des Stampfcontrollers haben sich aus diesem Umstand Probleme ergeben. Damit lässt sich auch begründen, warum später gebaute Maschinen klaglos in Betrieb genommen werden konnten.

berücksichtigt werden können¹⁵. In der erweiterten Variante können Berechnungen implementiert werden, mit dem Ziel, materialbedingte Ungleichmäßigkeiten auszugleichen.

¹⁵ Beispielsweise können verzögernde Einflüsse ausgeglichen werden, die durch Messungen vorher bestimmt worden sind.

8. ERKENNTNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

8.1 DIE HERSTELLUNG VON STAMPFKONTAKTEN

Bei einem Besuch einer Fertigung für Stampfkontakte¹ für Kohlebürsten wurde festgestellt, dass noch heute (2004) die Festlegung wichtiger Parameter der Erfahrung des Arbeiters an der Stampfmaschine überlassen bleibt. Er bestimmt damit indirekt auch die Qualität des Endproduktes mit. Die Qualität wird in der Regel nur dadurch gesichert, dass von Zeit zu Zeit eine genügend große Anzahl gefertigter Kohlebürsten der laufenden Produktion entnommen und geprüft werden.

Standardmäßig werden dabei der Übergangswiderstand und die Ausreißfestigkeit festgestellt und mit vom Hersteller vorgegebenen Zielwerten verglichen. Im Zusammenhang mit dem oben erwähnten Besuch konnte dabei auch festgestellt werden, dass es offenbar einen gewissen Anreiz darstellt, besser als gefordert zu produzieren und zu versuchen, damit bessere Ergebnisse zu erzielen als jene, die von Kollegen an benachbarten Maschinen erreicht werden.

Die Art, wie ein Stampfkontakt aufgebaut sein soll, wird von den Herstellern dieser sehr unterschiedlich beurteilt. Ein grundsätzlicher Unterschied besteht beim verwendeten Stampfpulver. Einerseits wird Graphit eingesetzt, andererseits Pulver aus Metall, wie Kupfer, versilbertes Kupfer und Eisenpulver, manchmal auch Metallpulver mit geringfügigen Zusatz von Graphitpulver.

Als Vorteile für der Verwendung eines aus reinem Graphitpulver bestehenden Stampfkontaktes werden von der Firmengruppe *Morgan Industrial Carbon* die höhere Beständigkeit bei extremen Betriebsbedingungen angeführt, wie sie beispielsweise in Motoren, die starken Vibrationen ausgesetzt sind oder bei denen hohe Stromstärken übertragen werden müssen, auftreten können. Als weiterer Vorteil wird angeführt, dass sich bei Erwärmung des Kupferpulvers an den Oberflächen der Pulverkörner isolierende Oxyde bilden können, die insgesamt die Leitfähigkeit eines Stampfkontaktes beeinträchtigen können. Dem steht gegenüber, dass Stampfkontakte, die mit Hilfe von Graphit hergestellt worden sind, nicht nur materialbedingt höhere Übergangswiderstände aufweisen, sondern bei sonst

¹ Fa. *Morgan Industrial Carbon* Sydney. Die Firmengruppe zählt zu den größten Herstellern für Materialien aus Kohlenstoff für die Elektrotechnik.

gleichen Voraussetzungen auch eine deutlich geringere Ausreißfestigkeit der Kabelverbindung besitzen. Üblicherweise werden genau diese Eigenschaften zur Bestimmung der Qualität eines Stampfkontaktes herangezogen. Erschwerend bei der Herstellung ist, dass sich Graphitpulver heikler bei der Verarbeitung zeigt, da es auf Grund der Luftfeuchtigkeit zum Verklumpen neigt². Während ein Stampfkontakt aus Metallpulver nach dem Versiegeln der Oberfläche fertig gestellt ist, muss beim Graphitpulver eine dünnflüssige Flüssigkeit zum Versiegeln verwendet werden, die einer Nachbehandlung bedarf. Nebenbei bemerkt ist diese Art der Herstellung derzeit noch durch Patente der Fa. *Morgan Industrial Carbon* geschützt. Interessant ist anzumerken, dass in der oben erwähnten Produktion der Fa. *Morgan Industrial Carbon* zu diesen Zeitpunkt nur etwa 50% der erzeugten Stampfkontakte mit Graphitpulver, der Rest jedoch mit Metallpulvern hergestellt worden sind.

Ein weiterer Unterschied bei der Herstellung von Stampfkontakten ergibt sich aus der Frage, ob die Befestigung des Kabels im Bohrloch mit Hilfe eines Knotens³ oder ohne diesen erfolgen soll. Auf Grund des Aufbaues eines Stampfkontaktes muss zuerst das im Stampfrohr eingefädelt Kabel in das Bohrloch eingeführt werden, danach das Stampfrohr zurückgezogen, Pulver in das Bohrloch gefüllt und verdichtet werden. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass, sollte kein Knoten gebildet worden sein, das Kupferseil nach dem Einführen in das Bohrloch festgehalten werden muss, damit es beim Zurückziehen des Stampfrohrs mit diesem nicht wieder aus dem Bohrloch herausgezogen wird. Man versucht dieses Problem dadurch zu lösen, dass das Kabel mangels anderer Möglichkeiten an seinem freien Ende festgehalten wird. Bedingt durch die Konstruktion einer Stampfmaschine ist dieses freie Ende jedoch etwa 30 cm (oder mehr) von jener Stelle entfernt, wo das Kabel festgehalten werden sollte. Es ist unschwer zu erkennen, dass eine gewisse Steife des Kabels, eine besonders leicht gleitende Kabelführung und eine Reihe anderer Maßnahmen erforderlich sind, um Stampfkontakte ohne Knoten herstellen zu können. Auch bei Stampfkontakten ohne Knoten ist der unmittelbare Nutzen nicht einfach festzustellen, da auf Grund der Herstellungsart nur nachteilige Einflüsse aufgezählt werden können, wie geringere Ausreißfestigkeit, höherer Übergangswiderstand, erschwerte und dadurch aufwendigere Fertigung sowie der Umstand, dass hochflexible

² Bei der besuchten Firma wurde der Produktionsvorrat in einem beheizten Kasten aufbewahrt und nur die gerade benötigten Mengen in die Vorratsbehälter der Maschinen eingefüllt.

³ Unter Knoten versteht man das in der Bohrung gestauchte Kupferkabel. Beim Einführen des Kabels in das Bohrloch wird die nach dem Abschneiden des Kabels überstehende Kabellänge in der Bohrung aufgespreizt.

Kupferkabel nicht verwendet werden können und zusätzlich ein Mindestdurchmesser des Kabels der Steife wegen nicht unterschritten werden kann. Dennoch wird diese Art der Herstellung eines Stampfkontaktes für die oben angeführten speziellen Anwendungen bei Kohlen für hohe Stromstärken verwendet, weil bedingt durch das höhere Volumen des zusammengepressten Kupferseils bei Erwärmung die Kohle durch die Ausdehnung der Kupfermasse zerstört werden kann.

8.2 BEWEGUNGSABLÄUFE BEIM STAMPFEN

Bei jeder Fertigung werden Produkte mit bestimmten Eigenschaften erzeugt. Neben vorgegebenen Materialeigenschaften der Grundwerkstoffe sind die Eigenschaften des Stampfkontaktes bestimmend für die Qualität einer Kohlebürste. Die automatisierte, maschinelle Herstellung unterschiedlicher Stampfkontakte erfordert die Verstellmöglichkeit von in der Regel voneinander abhängigen Maschinenparametern. Diese Abhängigkeiten wurden gezeigt und Fragestellungen zu den Parametern, deren Zusammenwirken, Beeinflussung und den Auswirkungen bei ihrer Verstellung auf das Endprodukt wurden beantwortet.

Ohne Kenntnis der Bewegungsabläufe beim Stampfen waren die bestimmenden Einflussgrößen und deren gegenseitige Beeinflussung sowie die Beeinflussung des Stampfkontaktes nicht zuordenbar.

Die ursprünglich von der Fa. *Schunk* vorgeschlagene Methode zur Aufzeichnung der Bewegungsabläufe wurde durch Hinzunehmen von Kontrollsignalen erweitert. Auf Grund der Erkenntnisse aus den Analysen der Aufzeichnungen sind die Ideen zur Entwicklung des Stampfcontrollers entstanden.

Die Ermittlung der Geschwindigkeiten aus den Weg - Zeitdiagrammen lieferte die Berechnungsgrundlagen zur im Stampfkontakt umgesetzten Energie. Die relative Konstanz dieser Geschwindigkeit und damit die Möglichkeit, sie vorher zu bestimmen⁴, haben zu Herstellvorschriften geführt, bei der Festigkeitswerte der Kohle, Bohrlochdurchmesser und Restwandstärke der Bohrung in Abhängigkeit zu gewünschten Produkteigenschaften gesetzt werden beziehungsweise wie derartige Eigenschaften erreicht werden.

⁴ Beispielweise durch die Wahl des Stampfdruckes und der Federn.

8.3 TECHNISCHE AUSRÜSTUNG DER FERTIGUNGSMASCHINEN

Der Einsatz von Co-Prozessoren, wie in der Computertechnik zur Entlastung des Hauptprozessors bekannt, ist im Stampfcontroller realisiert und bildet den Schlüssel für die exakte Kontrolle der Stampfung.

8.3.1 BESTEHENDENS STEUERUNGSKONZEPT

Der Start eines Stampfvorganges wird nach den vorbereitenden Arbeitsschritten durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt ist der Drehschieber (das rotierende Ventil) bezüglich seines Drehwinkels in einer vorher nicht bestimmbar Position. Dieser Umstand kann bewirken, dass der erste Stampfhub vorzeitig abgebrochen wird, weil der erzeugende Luftimpuls zu kurz ausfällt.

Am Drehschieber angebrachte Endschalter geben die möglichen Startzeitpunkte an den Stampfcontroller weiter, der seinerseits den Start kontrolliert. Die Einstellung der Positionen der Endschalter für die Startzeitpunkte war konstruktionsbedingt nicht möglich. Zur Verbesserung wird eine verdrehbare Trägerscheibe für die Schalnocken vorgeschlagen.

Es wurde gezeigt, dass die Position jenes Schalters, der das Ende des Stampfvorganges einleitet, sehr genau eingestellt werden muss. Für die Suche nach den Positionen (Drehwinkeln) am Drehschieber wurde eine entsprechende Einstellanweisung vorgeschlagen.

Weiteres wurde vorgeschlagen, dem in seiner Einstellung wegen eines größeren Einstellbereiches weniger kritischen Endschalter für den Startzeitpunkt jene Position zuzuweisen, die vom Drehschieber knapp vor dem Öffnen des Luftdurchlasses erreicht wird. Zweck dieser Maßnahme ist die Verringerung der Latenzzeit, die durch den zufälligen Startzeitpunkt im Steuerungsablauf gegeben ist.

Der Wegfall der vorher benötigten Abfragezeit für den durch den Stampfcontroller ersetzten mechanischen Endschalter bringt eine Verringerung der Taktzeit der Maschine⁵.

⁵ Die Verringerung der Taktzeit bewirkt eine Erhöhung der produzierten Kohlebürsten je Zeiteinheit, weil der Stampfvorgang normalerweise der am längsten dauernde Arbeitsschritt an der Maschine ist. Die Zeitersparnis beträgt ca. 0,15 Sekunden, das bedeutet bei einer Produktionsleistung von durchschnittlich 18 Kohlebürsten in der Minute eine Leistungssteigerung um 4,7 %.

8.3.2 LEISTUNGSGRENZEN DES BESTEHENDEN STEUERUNGSKONZEPTS

Die Kombination der Drehzahlregelung mit Frequenzumformer und Drehschieber ist technisch aufwendig, lässt jedoch eine stufenlose Veränderung der Schlagfrequenz zu.

Festgestellt worden ist, dass durch diese Art der Gerätekombination und zu einem kleineren Teil auch durch die Verlegung der pneumatischen Ansteuerleitung eine Grenzfrequenz existiert, die eine obere Schranke für die Schlagfrequenz darstellt. Betrachtet man zwei zeitbestimmende Faktoren, den anregenden Luftdruck für die Aufwärtsbewegung des Stampfzylinders und die Federkraft für die Schlagbewegung, als Festwerte, dann liegt diese Frequenz bei etwa 12 Schlägen pro Sekunde.

Durch die Untersuchung des Drehschiebers wurde gezeigt, dass der Einfluss der Entlüftung zum größeren Teil das Zeitverhalten beeinflusst. Aus der Analyse der Luftkanäle des Drehschiebers geht jedoch hervor, dass diese Entlüftung des Stampfzylinders verzögert durch ein in einem bestimmten Winkelbereich komplettes Verschließen von Zu- und Abluftkanälen erfolgt. Durch Veränderung der Luftführung durch Verlängerung der Ausfräsung des Abluftkanals um etwa 15° kann ohne Funktionseinbuße die Entlüftungsöffnung länger offen gehalten werden. Dieses längere Offenhalten stellt bei Erhöhung der Schlagfrequenz die benötigte Entlüftungszeit sicher. Auf Grund des derzeit vorgesehenen Drehwinkels von 180° für die volle Öffnung des Kanals kann die Drehzahl um weitere ca. 8 % gesteigert werden.

8.3.3 ERWEITERTES STEUERUNGSKONZEPT

Die Erzeugung der anregenden Luftimpulse für die Stampfbewegung kann anstelle der verwendeten Kombination Frequenzumformer – Drehschieber mit vorgeschaltetem Hauptventil durch ein geeignetes Ventil auch direkt erfolgen.

Der Versuchsaufbau entspricht genau dem vorher vorgestellten Modell (Abb. 4.5). Als Ventil wurde ein vorhandenes 2/3 Wege Magnetventil⁶ des Fabrikats *Festo* verwendet. Zur Ansteuerung des Ventils wurde die für den Stampfcontroller verwendete Mikrocontroller Plattform eingesetzt, wobei für die Anregung der Spule eine hochgenaue Impuls-Pausenfunktion als Programmteil implementiert worden ist. Zusätzlich wurde für den Versuch eine Eingabemöglichkeit für digital wählbare Einstellungen von Impuls- und Pausenzeit geschaffen.

⁶ Die Öffnungszeit des verwendeten Ventils lag bei 7 ms. Vorgeschlagen wird, ein Ventil mit Hilfs-luftansteuerung einzusetzen, das kürzere Schaltverzögerungen zulässt.

Um mit einer möglichst hohen Schlagfrequenz arbeiten zu können, sind die Schaltzeiten des Ventils von Bedeutung. Deterministisches Verhalten wird dadurch erreicht, dass die Ansteuerung ohne nennenswerte Verzögerungen erfolgt. Die für den Stampfcontroller verwendete Mikrocontroller Plattform weist dieses Schaltverhalten auf.

Vorteil dieser Schaltung ist, dass die Abfrage des Stampfniveaus genau einen Schritt vor der Ausgabe des nächsten Impulses erfolgen kann. Dadurch kann das Ende des Stampfvorganges exakt erfasst werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass das Ventil direkt beim Stampfzylinder montiert werden kann. Dadurch werden kurze Luftleitungen ermöglicht, es sind daher Zeitverzögerungen durch die ein- oder ausströmende Luft weitgehend auszuschließen. Derzeit arbeitet eine Maschine⁷ im Dauereinsatz, wobei auf Grund des Schaltverhaltens Ventile parallel geschaltet worden sind.

8.3.4 ZUKÜNFTIGE MÖGLICHKEITEN DER STEUERUNG

Bei den bisher ausgeführten Steuerungsvarianten werden Festwerte für Impuls- und Pausenzeiten verwendet. Das Infragestellen dieser Vorgehensweise führt zu erweiterten Konzepten und Programmvarianten. Insbesondere kann das Einbeziehen der Fähigkeit, Berechnungen und hochgenaue Zeitmessungen durchzuführen, in der Kontrolle des Stampfvorganges genutzt werden.

Eine einfache Programmvariante, bei der versuchsweise die Belüftungszeit⁸ des Stampfzylinders nach jedem Hub um eine bestimmte, feste Zeitspanne verringert wird, wurde zwar in einer Versuchsschaltung bereits implementiert, jedoch noch nicht bei einer Produktionsmaschine getestet.

Als Ausblick für die Weiterentwicklung ist die Berechnung der einzelnen Lagen einer Füllung denkbar, wobei die derzeit vorhandene Sensorik als ausreichend angenommen werden darf. Die Dimensionierung der Eingangsbeschaltung, die bei den verwendeten Probeschaltungen und Einsatzsystemen als Zeitkonstante 1 ms aufweist, kann einfach verändert werden.

⁷ Im Jahr 2004. Die typische Schlagfrequenz bei dieser Maschine beträgt 15 Schläge/Sekunde. Die Steuerung dieser Maschine ist auf Grund der geringen Komplexität eine kleine SPS (drei Stationen, daher keine Zykluszeitprobleme).

⁸ Für die Verminderung der Belüftungszeit wurde unterstellt, dass auf Grund der kleiner werdenden Hubhöhe eine geringere Hubzeit genügt. Eine weitere Überlegung ist, durch Verringerung der Hubzeit eine geringer werdende Pulvermenge zu dosieren und dadurch die Stampfung zu verstärken.

Gedacht ist, die Zeiten mit einer Auflösung von besser $0,1 \text{ ms}^9$ zu erfassen, um aus den Zeitdifferenzen, die beim Passieren des Niveaus gestoppt werden können, die Bewegungen des Stampfzylinders zu beeinflussen. Ausgewertet werden können sowohl die Füllzeit als Abstand zwischen steigender und fallender Flanke, wie auch die Zeit zwischen zwei Füllungen. Darüber hinaus ist die Möglichkeit gegeben, vorgegebene Werte in einem Lernschritt zu zwischenspeichern und mit nachfolgenden Ergebnissen zu vergleichen. Damit lassen sich Qualitätskriterien festhalten, wobei entsprechende Warn- und Ausscheidungskriterien für den Stampfkontakt abgeleitet werden können.

Abgesehen von dem Umstand, dass die Schaltung klein genug ist, um diese direkt in einem Gehäuse beim Stampfkopf unterzubringen, kann sie noch wesentlich verkleinert werden. Ergänzt mit einer Anzeige für die durchgeführten Verdichtungsschläge kann sie auch die bei den meisten Maschinen verwendete Schlagzahlanzeige ersetzen.

Die Erfassung der eingesetzten Schlagenergie kann durch eine einfache Erweiterung der Sensorik am Stampfkopf durch einen zusätzlichen Abfragepunkt in einem fest definierten Abstand zum Niveauekontakt ermöglicht werden. Bei der Schlagbewegung wird die benötigte Zeitdifferenz beim Passieren dieser Punkte gemessen und die resultierende Geschwindigkeit errechnet. Damit kann die Schlagenergie errechnet werden. Mit Kenntnis der Schlagenergie kann beispielweise bei zu geringer Schlagkraft der Stampfcontroller Verdichtungsschläge einfügen, bei zu hoher Schlagkraft die Füllzeit verlängern.

8.4 ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES

Die Parameter, mit Hilfe derer die elektrischen Eigenschaften oder die Festigkeit eines Stampfkontaktes beeinflusst werden, können nicht völlig isoliert voneinander betrachtet werden. Höhere Festigkeit ist in der Regel mit geringerem Übergangswiderstand gleichzusetzen.

Zwei verschiedene Versuchsreihen haben unterschiedliche Ergebnisse gezeigt.

In der ersten Versuchsreihe wurden relativ hohe Proben aus den untersuchten Stampfpulvern hergestellt und untersucht. Deutlich bei diesen Proben ist die Inhomogenität in der Wirkungsrichtung des Druckaufbaues erkennbar. Erklärt wird dieser Umstand durch die Art und Weise der Probenherstellung.

⁹ Die Frage der Auflösung ist in Abhängigkeit von der Signalerfassung, diese kann für einen Eingang sogar besser als $1 \mu\text{s}$ sein, und von der Reaktionszeit des Ausgabegerätes zu untersuchen. Sie beträgt beim weiter oben erwähnten Schnellschaltventil besser 2 ms .

Als erstes Zwischenergebnis ist festgestellt worden, dass sich die verwendeten Pulver unterschiedlich gut verpressen lassen. Das bedeutet, dass das Material Pulver in die Liste der Parameter mit aufgenommen werden muss.

Die festgestellten unterschiedlichen Probengewichte wurden auf differierende Korngrößen der Pulver zurückgeführt. Im realen Einsatz an der Maschine muss daher mit differierenden Füllmengen auf Grund der Streuungen der Korngrößen gerechnet werden. Eine Verbesserung kann durch die Zulassung eines Feinanteils bewirkt werden, wobei allerdings vorher die Auswirkungen des geänderten Pulvers auf insbesondere die Schlaggeschwindigkeit untersucht werden muss.

Aus der zweiten Versuchsreihe lässt sich die Tendenz ableiten, dass hohe Verpressungen von Stampfpulvern auch bei geringer Schlagenergie erreicht werden können, wenn die Pulvermenge pro Schlag reduziert wird.

Die Messergebnisse der Widerstandsmessungen haben den Zusammenhang Verpressungsgrad - Widerstand verdeutlicht. Festgestellt wurde die Geringfügigkeit der Abweichungen von den Messwerten, die mit Hilfe der grundsätzlich unterschiedlichen Messverfahren gewonnen worden sind

Einen nahezu linearen Anstieg und Abfall der Widerstandskurve von der Messreihe einer Probe hat die festgestellte unterschiedliche Verpressung bei hohen Füllmengen des Stampfpulvers gezeigt.

Teilweise war die Interpretation von Ergebnisse aus den Messungen für den spezifischen Widerstand nicht eindeutig einzuordnen. Dazu sind weitere Untersuchungen notwendig. Eindeutig ist jedoch die Tendenz, dass bei steigenden Pressdrücken niedrigere spezifische Widerstände festzustellen waren.

8.5 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES STAMPFKONTAKTES

Grundlegende Erkenntnisse stammen aus Materialuntersuchungen der verwendeten Pulver, die in Versuchen überprüft wurden und aus Messungen nach Stampfversuchen an fertigen Kohlebürsten.

8.5.1 ERGEBNISSE DER MATERIALUNTERSUCHUNG DES STAMPFPULVERS

Auf Grund des Umstandes, dass die verwendeten Pulver als stark dentritisch bezeichnet werden dürfen, wurde erwartet, dass die zur Probenerzeugung angewendeten hohen Kräfte die zarten Verästelungen in der Pulverstruktur deutlich sichtbar verformen.

Die festgestellte Verformung kann als eher geringfügig bezeichnet werden.

Es hat sich gezeigt, dass sich die Verästelungen der Pulverkörner beim Verpressen ineinander schieben und das Pulver zusammen halten.

In diesem Zusammenhang ist ein weiterer Umstand interessant: beim Brechen der untersuchten Prüflinge sind diese nicht genau in der Mitte der Probe zerbrochen. Offenbar gibt es bezogen auf die Länge der erzeugten Proben Stellen mit geringerer Festigkeit, da diese jeweils etwa in Teile mit 60 % bzw. 40 % der gesamten Länge zerfallen sind. Dabei war der kürzere Teil immer derjenige, dessen Unterseite am Unterstempel der Presse situiert gewesen ist. Andererseits wurde bei den Messungen mit der Wirbelstromsonde gezeigt, dass das Maximum des spezifischen Widerstandes, über die Länge der Probe gesehen, etwa bei der oben erwähnten Bruchstelle liegt.

EINE BETRACHTUNG ZUR FESTIGKEIT

Es ist aus metallurgischen Untersuchungen bekannt, dass bei reinen Metallen, bezogen auf die durch das Kristallwachstum entstehenden Korngrenzen, an den Korngrenzen die Festigkeit höher ist als im Metallkristall selbst. Daher gilt allgemein, dass feinkörniges Metall auf Grund seines höheren Anteils an Korngrenzen bei gleichem Rauminhalt eine höhere Festigkeit besitzt (vgl. [Kau85]).

Vergleicht man die Aufnahmen (vgl. Anhang A) der lose geschütteten unterschiedlichen Pulver im Maßstab 1:30, sind nur geringe Unterschiede des Aussehens bei den beiden Kupferpulvern und ein etwas größerer Unterschied zum Eisenpulver festzustellen. Insgesamt ist jedoch die Korngröße aller Pulver annähernd gleich, d.h. es existiert ein prozentuell nur sehr kleiner Pulveranteil außerhalb der Nennkorngröße von 250 µm.

Wenigstens die Dichte des Stampfkontaktes könnte durch das Zulassen eines Feinanteils im jeweils angewendeten Pulver gesteigert werden. Die Vermutung

liegt nahe, dass auch Festigkeit und der spezifische Widerstand dadurch positiv beeinflusst werden können.

VERLUST DER FESTIGKEIT BEI THERMISCHER BELASTUNG

Ein bekanntes Phänomen bei Kohlebürsten ist, dass der Stampfkontakt aus der Bohrung unter bestimmten Betriebsbedingungen, speziell bei hoch belasteten Kohlebürsten, herauswandert. Erklärt wird dieses Phänomen mit den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Grundmaterialien Kohlenstoff und Metallpulver. Diese Erklärung ist plausibel, weil bei Stampfkontakten, die mit Graphitpulver erzeugt worden sind, dieses Phänomen nie beobachtet worden ist.

Ein Lösungsvorschlag ist, die Eigenschaften des Pulvers durch Zusätze zu verändern. Untersuchungen dazu werden durch die Hersteller von Kohlebürsten vorgenommen.

Ein völlig anderer Vorschlag, der noch nicht Gegenstand von Untersuchungen ist, soll hier vorgestellt werden.

Es ist bekannt, dass Metallpulver einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizient besitzt als Kohlenstoff. Bei hohen Übergangswiderständen wird also der Stampfkontakt bei Belastung erwärmt und dehnt sich aus. Es ist weiters bekannt und durch die Materialuntersuchungen nachgewiesen, dass verpresstes Stampfpulver, aus der Presse entnommen, die Tendenz zeigt, sich wieder auszudehnen. Dieser Umstand wird auch dazu genutzt, das Kabel in der Bohrung zu verkeilen. Dehnt sich auf Grund der zugeführten Wärme der Stampfkontakt aus, kann die Längenänderung groß genug werden, um über den Bohrungsrand herauszuragen. Ohne den Gegendruck der Matrize (Bohrung in der Kohle) weitet sich das verpresste Pulver auf. Der entstehende Wulst hält den Stampfkontakt am Bohrungsrand fest und zieht den Stampfkontakt aus der Bohrung heraus.

Die Abhilfe ist einfach: man berücksichtigt bei der Herstellung der Stampfung die mögliche Längenänderung und setzt das Stampfniveau entsprechend tiefer.

8.5.2 ERGEBNISSE DER STAMPFVERSUCHE

Die dämpfenden und damit bremsenden Einflüsse der Abwärtsbewegung sind in der ermittelten Größe nicht erwartet worden, da speziell auf die Einhaltung ausreichender Toleranzen, wie beispielsweise symmetrische Aufhängung der Federn,

Einstellung des Stampfrohes im Zentrum der Bohrung, etc., bei der Maschineneinstellung geachtet worden ist.

Diese dämpfenden Einflüsse sind im Wesentlichen die Reibungsverluste durch das Stampfrohr im Pulvertrichter und das Kabel nebst der Klemmzange innerhalb der Kabelführung durch das Stampfrohr.

Bestätigt wurde die Erwartung der Steigerung der Schlagenergie durch Verstärkung der Zugfedern. Die Erwartung, durch die Zugfedern eine annähernd lineare Steigerung der Schlaggeschwindigkeit zu erzielen, konnte jedoch nicht bestätigt werden. Die fehlende Linearität erschwert das Vorherbestimmen der Schlagenergie. Vermutet wird, dass eine Mengenbeschränkung der ausströmenden Luft zu diesem Verhalten beiträgt.

Es existiert auch ein Zusammenhang zwischen der Schlagfrequenz und der erreichbaren Geschwindigkeit. Als Ursache wird das Entlüftungsverhalten des Drehschiebers vermutet, der bei niedrigeren Frequenzen entsprechend langsamer die Abluftleitung öffnet.

Die genaue Analyse der Aufzeichnungen der Bewegungsabläufe hat auch ergeben, dass die Schlaggeschwindigkeiten mit steigender Anzahl der Schläge tendenziell kleiner werden, erklärbar durch die geringer werdende Fallhöhe, jedoch unvorhersehbar sowohl positiv als auch negativ von dieser Tendenz abweichen können. Als Ursache dafür kommen sowohl das Entlanggleiten des Stampfrohes am Kabel, als auch Verkeilen von Pulverpartikeln im Pulvertrichter oder in der Kohlebürste in Frage.

Die Stampfversuche haben ein zunächst unerwartetes Verhalten des Stampfkontaktes bei Verwendung des versilberten Kupferpulver gezeigt. Dabei wurde bei höherer Krafterwirkung durch geringere Pulvermenge aber gleichbleibender Schlagkraft beim Stampfen der erzielte Übergangswiderstand tendenziell kleiner. Eine Erklärung könnte die Zerstörung der oberflächlichen Silberschicht durch Abrieb sein. Weiters wurde festgestellt, dass bei gleicher Qualität die Füllmenge erhöht bzw. die Schlagzahl um 25 % verringert werden kann.

Abschließend wird jedoch darauf hingewiesen, dass die hier gefundenen Materialergebnisse nicht isoliert betrachtet werden dürfen, weil auch die nicht erfassten Materialeigenschaften der Kohle in diesen enthalten sind.

8.6 ZUSAMMENFASSUNG

Die Festlegung wichtiger Parameter bleibt bei vielen Fertigungsbetrieben der Erfahrung des Arbeiters an der Stampfmaschine überlassen, der damit indirekt auch die Qualität des Endproduktes mitbestimmt. Die Qualität wird in der Regel in diesen Fällen nur dadurch gesichert, dass von Zeit zu Zeit eine genügend große Anzahl gefertigter Kohlebürsten der laufenden Produktion entnommen und geprüft werden.

Die Art, wie ein Stampfkontakt aufgebaut sein soll, wird von den Hersteller dieser sehr unterschiedlich beurteilt. Während die Kohlenstoffmaterialien des Grundkörpers einer Kohlebürste weitgehend ähnliche Eigenschaften aufweisen bzw. durch die Rezepturen vorbestimmt werden, besteht ein grundsätzlicher Unterschied beim verwendeten Material der Stampfpulver und der Art der Knotenbildung. Ziel jeder Fertigung ist es, Produkte mit vorher bestimmten Eigenschaften zu erzeugen. Neben vorgegebenen Materialeigenschaften der Grundwerkstoffe sind die zu erzielenden Eigenschaften des Stampfkontaktes bestimmend für die Qualität einer Kohlebürste. Die automatisierte, maschinelle Herstellung unterschiedlicher Stampfkontakte erfordert daher die Verstellmöglichkeit von in der Regel voneinander abhängigen Maschinenparametern.

Ohne Kenntnis der Bewegungsabläufe beim Stampfen waren die bestimmenden Einflussgrößen und deren gegenseitige Beeinflussung sowie die Beeinflussung des Stampfkontaktes nicht zuordenbar.

Die Entwicklung des Stampfcontrollers als Co-Prozessor, wie in der Computertechnik zur Entlastung des Hauptprozessors bekannt, bildet den Schlüssel für die exakte Kontrolle der Stampfung. Die für die Variation der Schlagfrequenz verwendete Kombination der Drehzahlregelung mit Frequenzumformer und Drehschieber ist technisch aufwendig, lässt jedoch eine stufenlose Veränderung der Schlagfrequenz zu. Dazu ist festgestellt worden, dass eine Grenzfrequenz existiert, die eine obere Schranke für die Schlagfrequenz darstellt. Durch die Untersuchung des Drehschiebers wurde gezeigt, dass der Einfluss der Entlüftung zum größeren Teil das Zeitverhalten beeinflusst.

Als erweiterte Verwendung wurde zur Ansteuerung des Ventils die für den Stampfcontroller verwendete Mikrocontroller Plattform eingesetzt, wobei für die Anregung der Spule eine hochgenaue Impuls- Pausenfunktion als Programmteil implementiert worden ist. Zusätzlich wurde für den Versuch eine Eingabemöglichkeit für digital wählbare Einstellungen von Impuls- und Pausenzeit geschaffen. Um mit einer möglichst hohen Schlagfrequenz arbeiten zu können,

sind die Schaltzeiten des Ventils von Bedeutung. Deterministisches Verhalten wird dadurch erreicht, dass die Ansteuerung ohne nennenswerte Verzögerungen erfolgt. Die für den Stampfcontroller verwendete Mikrocontroller Plattform weist dieses Schaltverhalten auf. Bei den bisher erprobten Steuerungsvarianten werden Festwerte für Impuls- und Pausenzeiten verwendet. Das Infragestellen dieser Vorgehensweise führt zu erweiterten Konzepten und Programmvarianten. Insbesondere kann das Einbeziehen der Fähigkeit Berechnungen und hochgenaue Zeitmessungen durchzuführen in das Konzept der Kontrolle des Stampfvorganges genutzt werden.

Grundlegende Erkenntnisse stammen aus Materialuntersuchungen der verwendeten Pulver, die in Versuchen überprüft wurden und aus Messungen nach Stampfversuchen an fertigen Kohlebürsten.

WEITERE MATERIALEIGENSCHAFTEN DES STAMPFPULVERS

Die Materialeigenschaften des Stampfpulvers sind ein Teilaspekt bei der Beurteilung von Stampfkontakten. In Zuge der Untersuchungen wurden verschiedene Pulver verpresst und die daraus erzeugten Prüflinge weiteren Untersuchungen unterworfen. Eine dieser Untersuchungen war das Brechen der Prüflinge und die photographische Aufnahme der Bruchflächen unter dem Elektronenmikroskop, um Kenntnis zur Art und zum Grad der Verpressung zu erhalten. Nachstehend sind die erzeugten Aufnahmen zusammengestellt. Die Aufnahmen wurden für die betrachteten Proben in verschiedenen Vergrößerungen hergestellt. Die Abbildungen sind jeweils durch das Pulver, dem Pressendruck und der Vergrößerung gekennzeichnet. Vergleichend untersucht wurden nur die kupferhältigen Pulver. Anzumerken ist, dass auf den Aufnahmen 200:1 die Größenordnung der Körner (etwa 250 μm) der verwendeten Pulver im Vergleich an den eingblendeten Maßen erkennbar ist.

A.1 STAMPFPULVER NR. 1 (EISENPULVER)

Für das Eisenpulver¹ stehen nur Aufnahmen von lose gestreutem Pulver zur Verfügung. Erkennbar bei den Bildern sind die Kornform und Struktur.

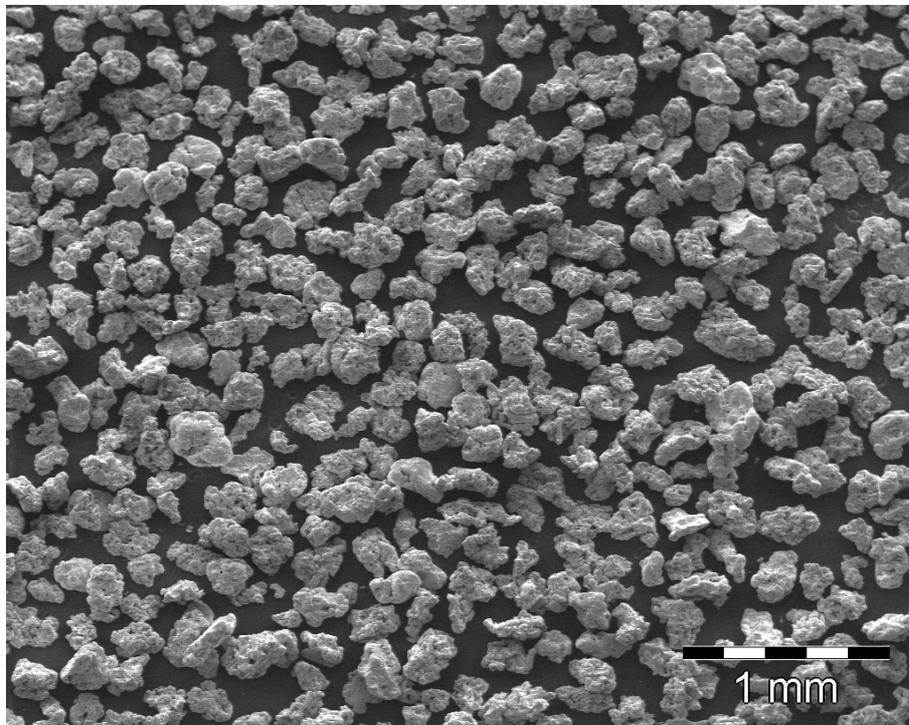


Abb. A.A1.1: Eisenpulver, lose (30:1)

¹ Als weitere Bezeichnung wird Eisenpulver auch unter der Nr. 1930 geführt.

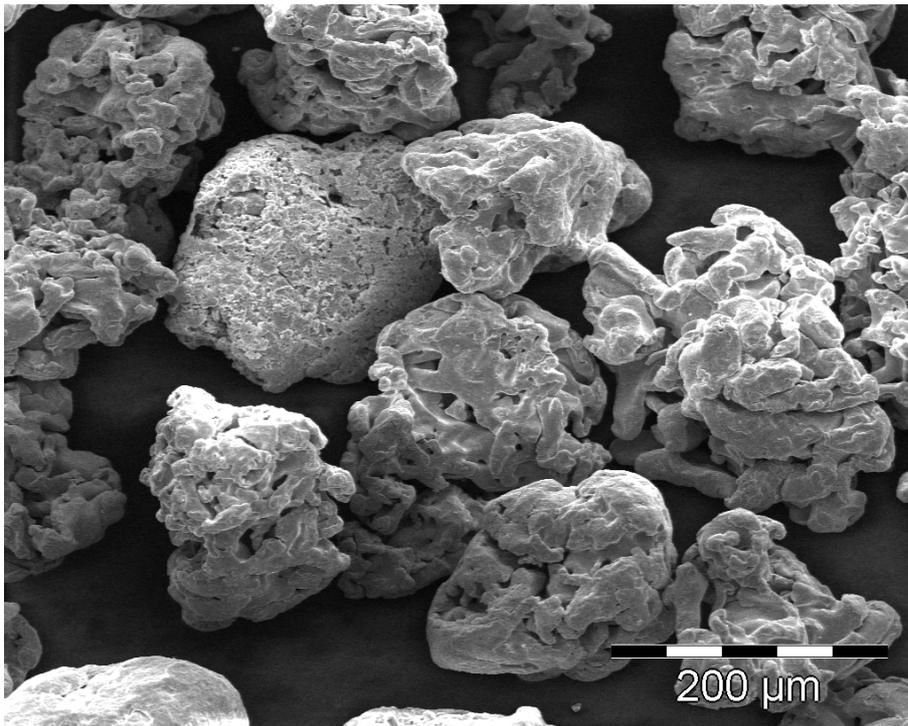


Abb. A.A1.2: Eisenpulver, lose (200:1)

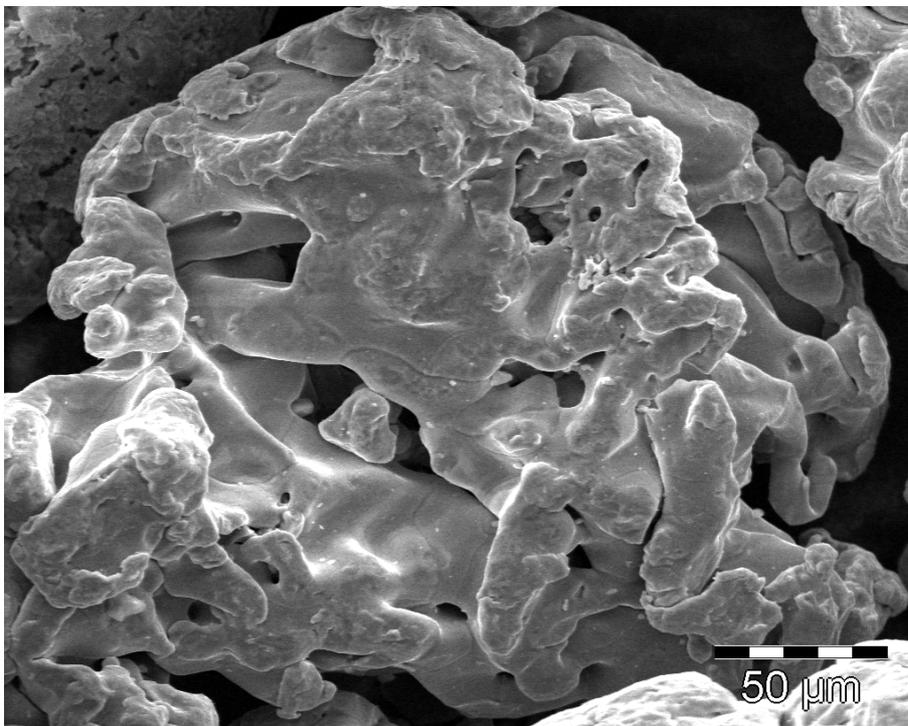


Abb. A.A1.3: Eisenpulver, lose (500:1)

Das gezeigte Eisenpulver besitzt eine körnige, schwach dendritische Struktur.

A.2 STAMFPULVER NR. 6 (VERSILBERTES KUPFERPULVER)

Für dieses Pulver² stehen Aufnahmen Proben zweier Druckstufen zur Verfügung.

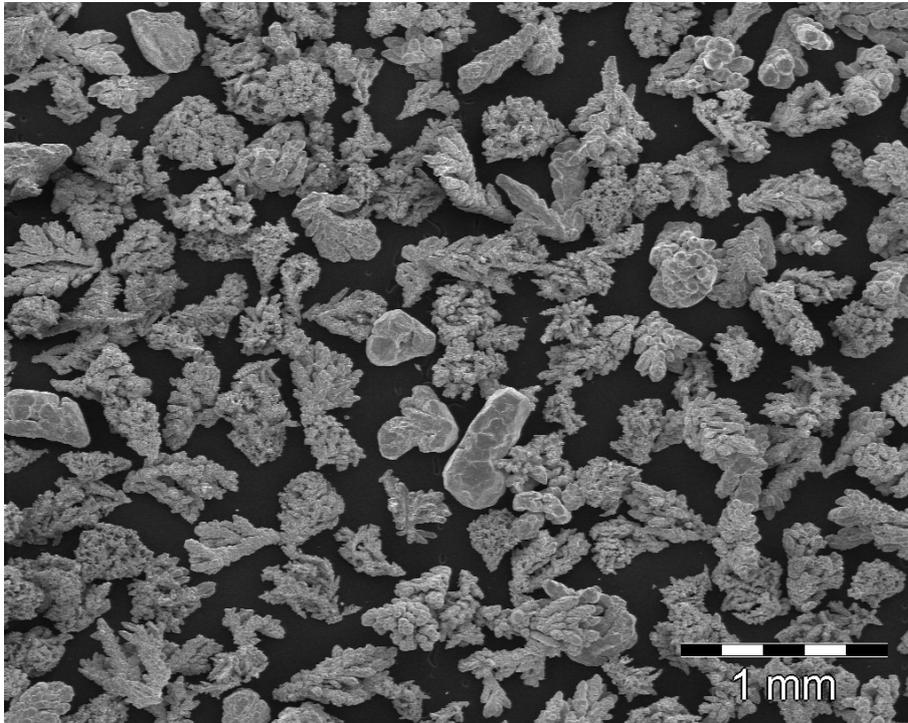


Abb. A.A2.1: versilbertes Kupferpulver, lose t (30:1)

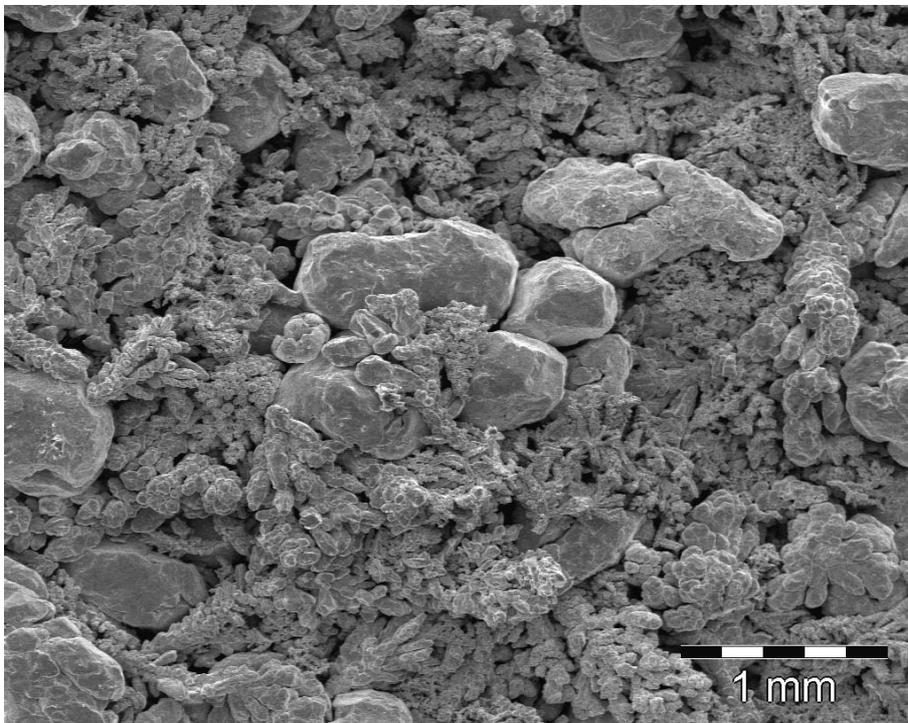


Abb. A.A2.2: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (30:1)

² Auch als Pulver Nr. 1962 bezeichnet.

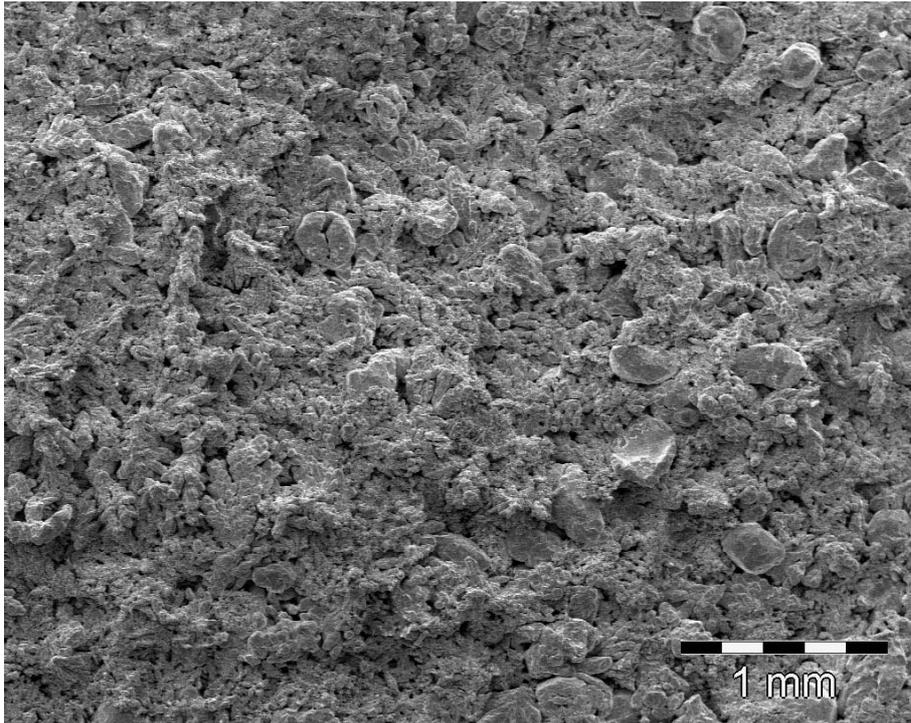


Abb. A.A2.3: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (30:1)

Versilbertes Kupferpulver ist dendritisch. Vergleicht man die Strukturen der Pressungen, sind bei der Probe mit einer Verpressung mit 0,6 t einzelne Körner leicht unterscheidbar. Die Anzahl einzeln identifizierbarer Körner ist bei der mit höherem Druck erzeugten Probe in diesem Maßstab bereits deutlich geringer.

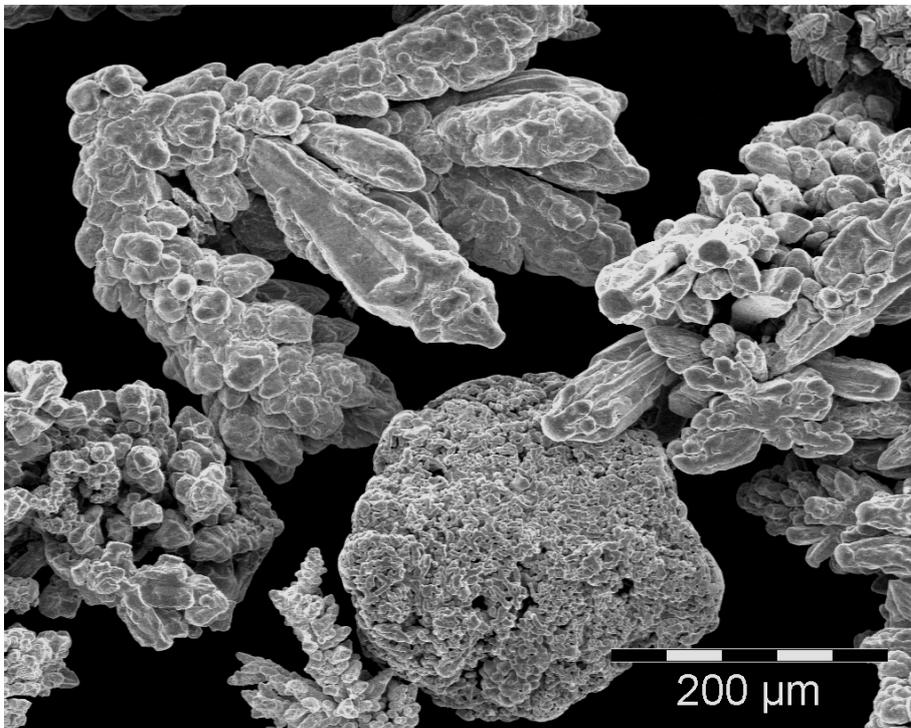


Abb. A.A3.1: versilbertes Kupferpulver, lose (200:1)

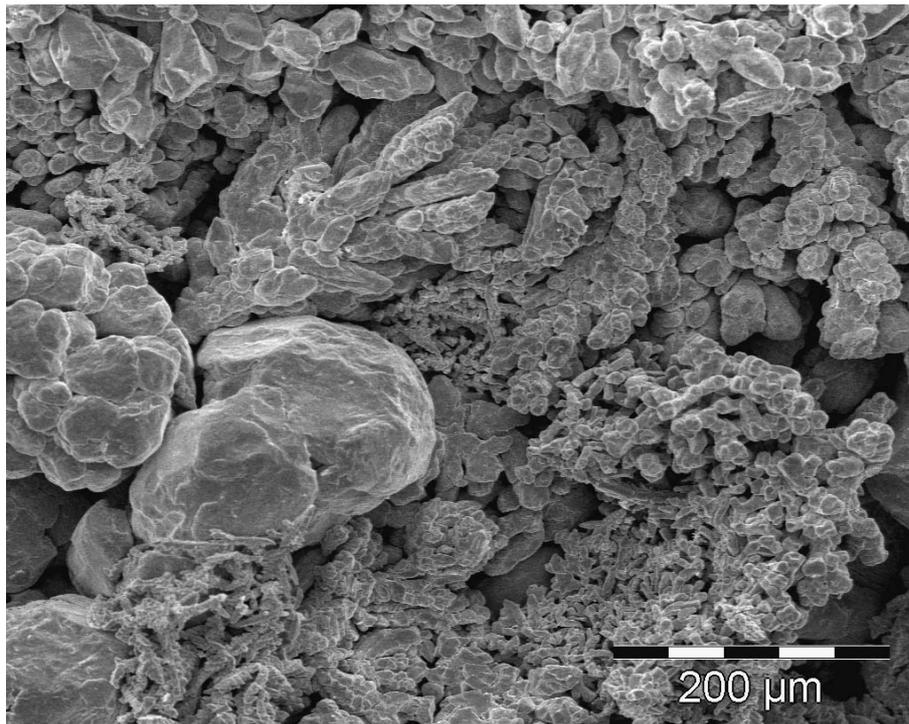


Abb. A.A3.2: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (200:1)

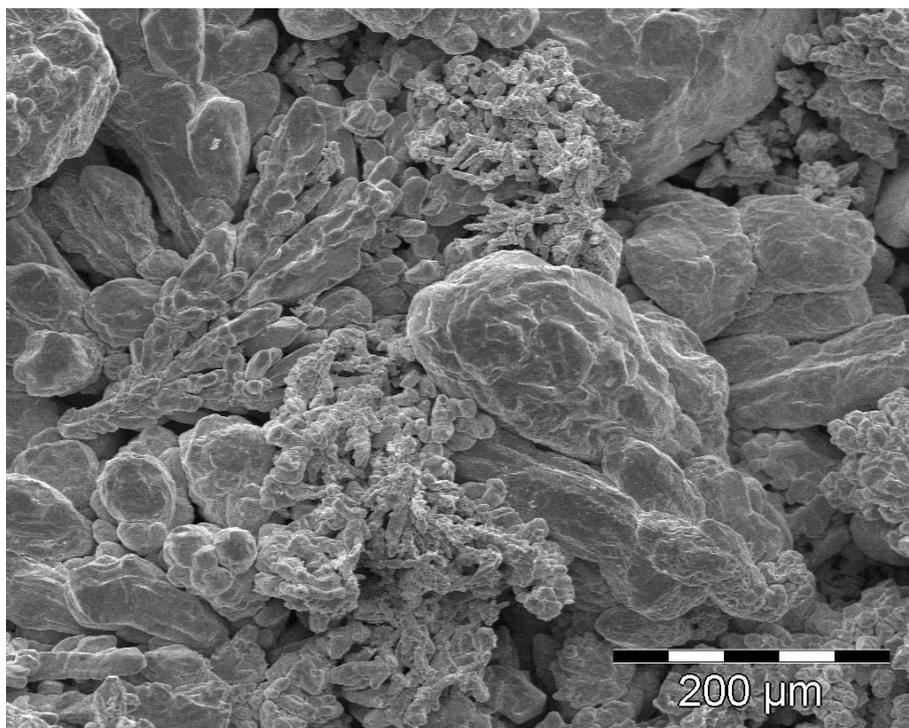


Abb. A.A3.3: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (200:1)

Auch bei dieser Vergrößerung wird die vorherige Beobachtung bestätigt. Die folgenden Aufnahmen zeigen die einzelnen Pulverkörner in einem Maßstab von 500:1, wobei die Gesamtlänge des eingeblendeten Maßbalkens der typisch verwendeten Korngröße entspricht (250 µm).

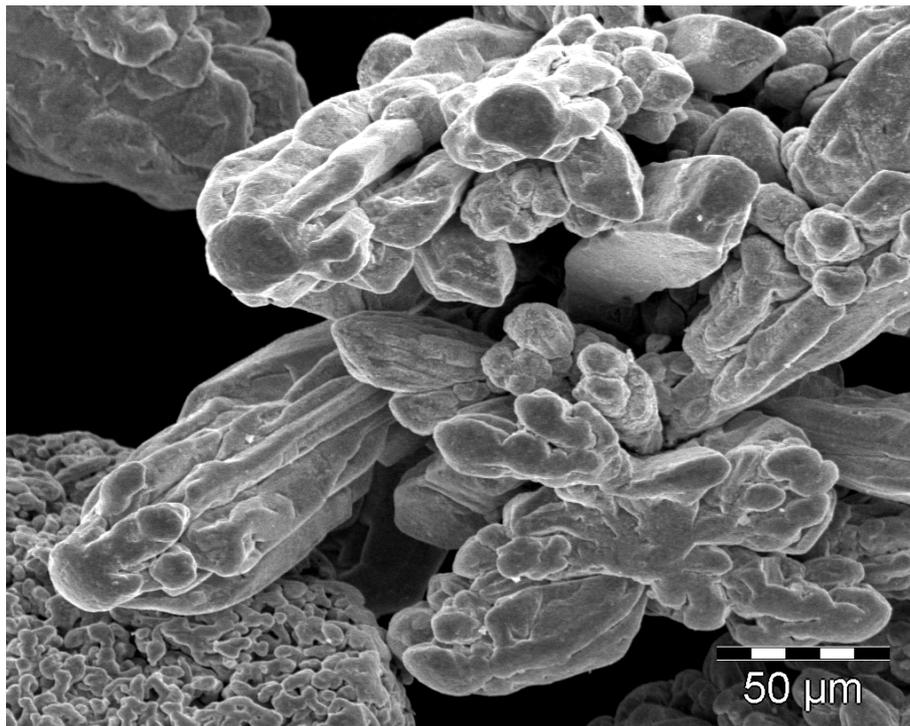


Abb. A.A4.1: versilbertes Kupferpulver, lose (500:1)

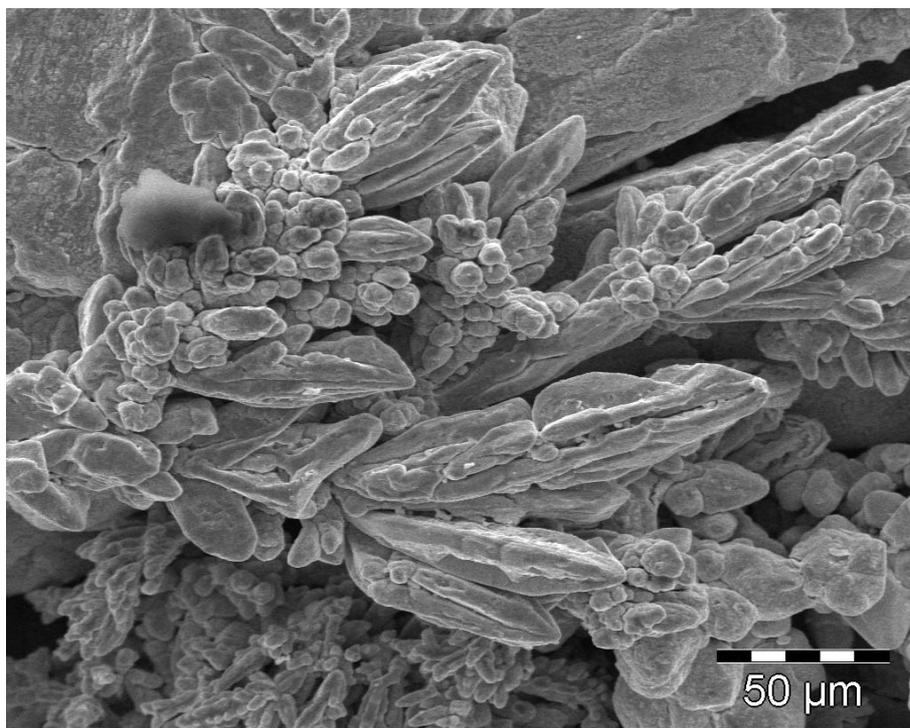


Abb. A.A4.2: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (500:1)

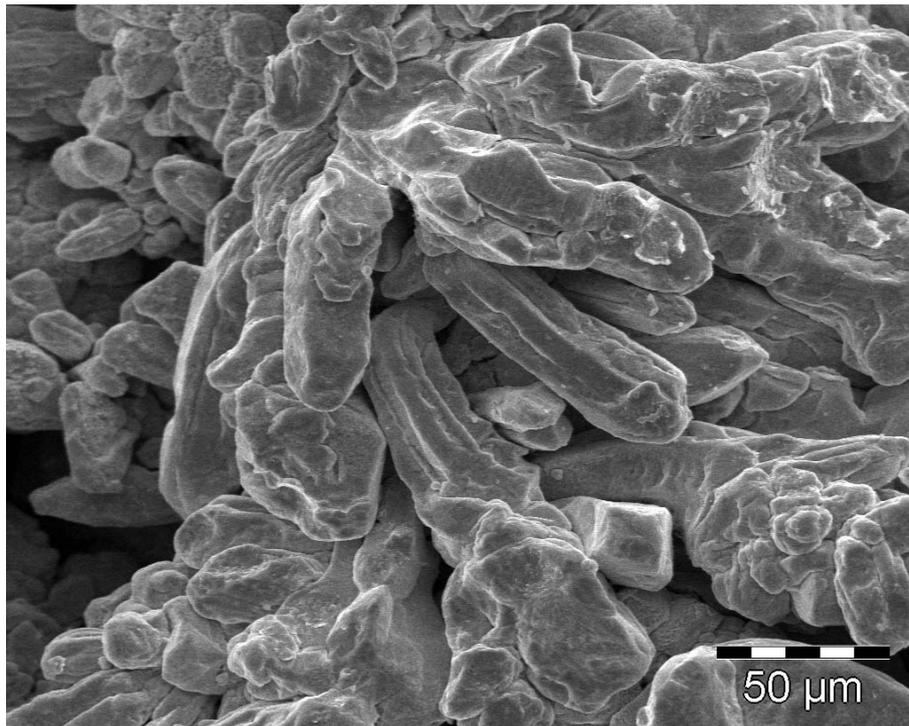


Abb. A.A4.3: versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (500:1)

Der dargestellte Bildausschnitt besitzt eine Breite etwa 250 μm und einer Höhe von 200 μm , also etwa der Nenngröße eines Pulverkorns. Obwohl eine Pressenkraft bis zu 1,4 t zur Herstellung der Proben verwendet worden ist, sind die Zwischenräume des Pulvers deutlich erkennbar. Man hätte erwarten können, dass sich die Pulverkörner auf Grund der dendritischen Grundform mit den dünnen und damit weniger widerstandsfähigen Verästelungen unter der Pressenwirkung stark verformen.

Die Bilder zeigen jedoch an den Oberflächen der Proben eine ähnliche Feinstruktur, wie sie schon beim lose geschütteten Pulver erkennbar war. Der Verformungsgrad der einzelnen Körner ist also verhältnismäßig gering. Beim Brechen der Proben hat sich auch gezeigt, dass einzelne Pulverkörner von den Bruchflächen abbröseln.

Diese Beobachtung deckt sich mit den vorher ermittelten Werten für die Formänderung (Kap. 5). Die im untersuchten Druckbereich festgestellte Linearität der prozentuellen Formänderung kann auf das ineinander Schieben der Körner mit einer, aus den Bildern nicht unmittelbar ablesbaren jedoch vermuteten, verhältnismäßig geringen Formänderung erklärt werden.

A.3 STAMPFPULVER NR. 3 (KUPFERPULVER)

Aufnahmen von Proben dieses Pulvers³ wurden nur in einer Druckstufe erzeugt.

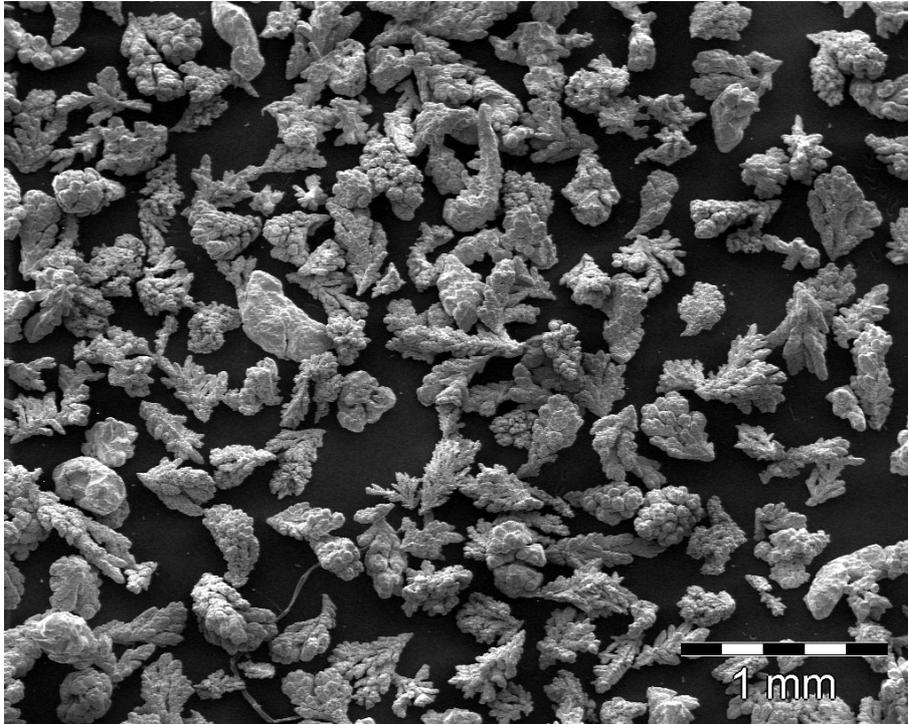


Abb. A.A5.1: Kupferpulver, lose t (30:1)

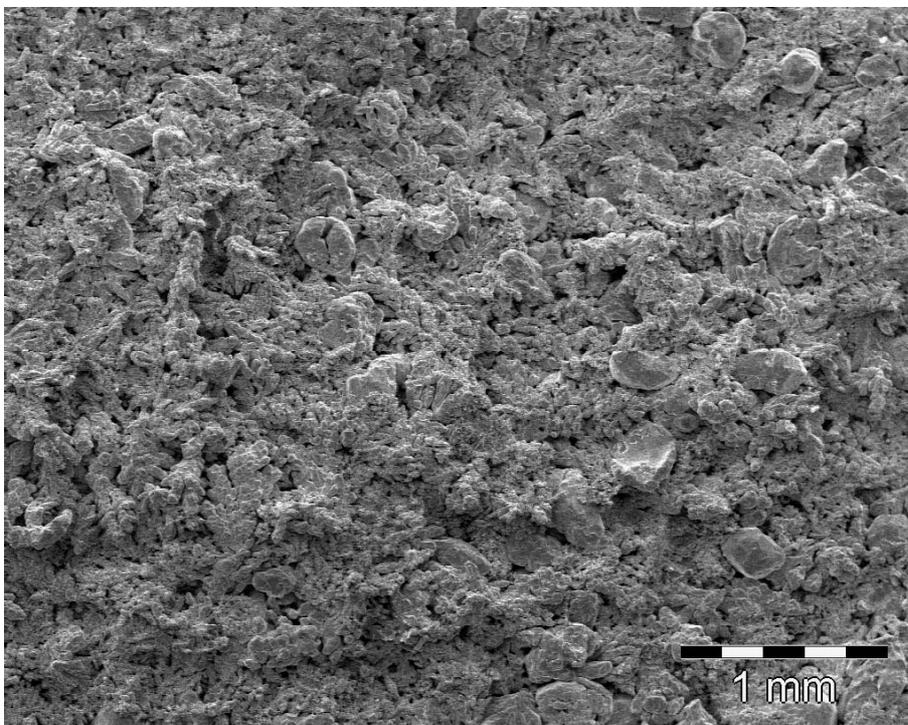


Abb. A.A5.2: Kupferpulver, Verpressung mit 0,9 t (30:1)

³ Auch als Pulver Nr. 1936 bezeichnet.

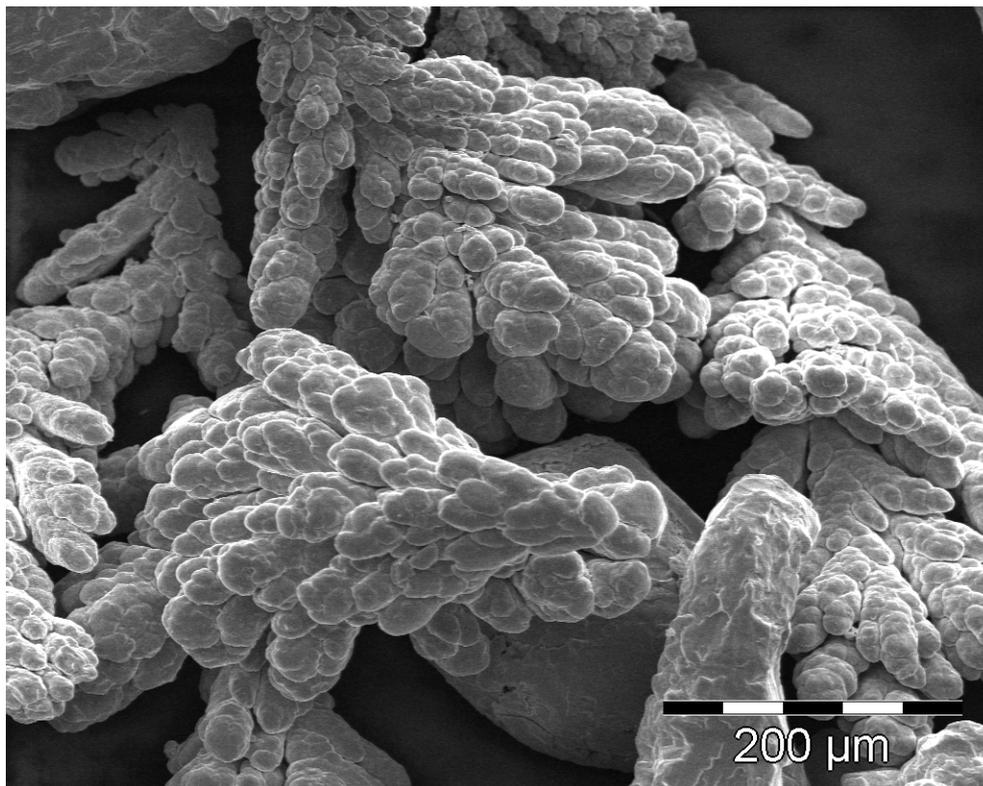


Abb. A.A6.1: Kupferpulver, lose (30:1)

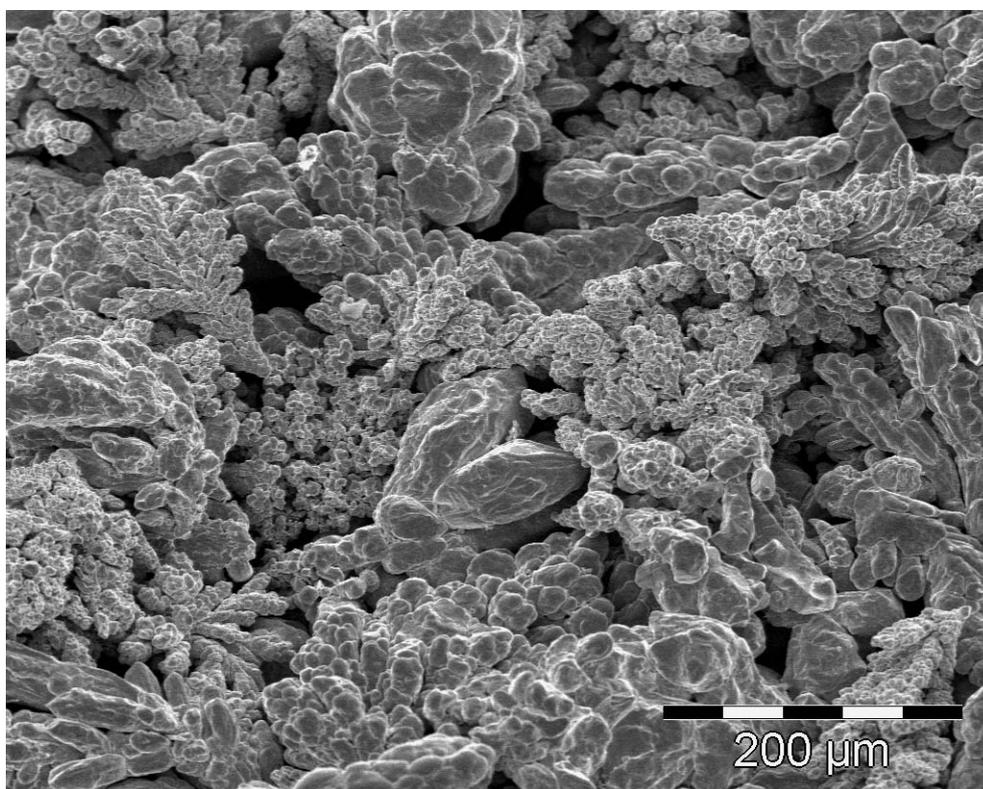


Abb. A.A6.2: Kupferpulver, Verpressung mit 0,9 t (30:1)

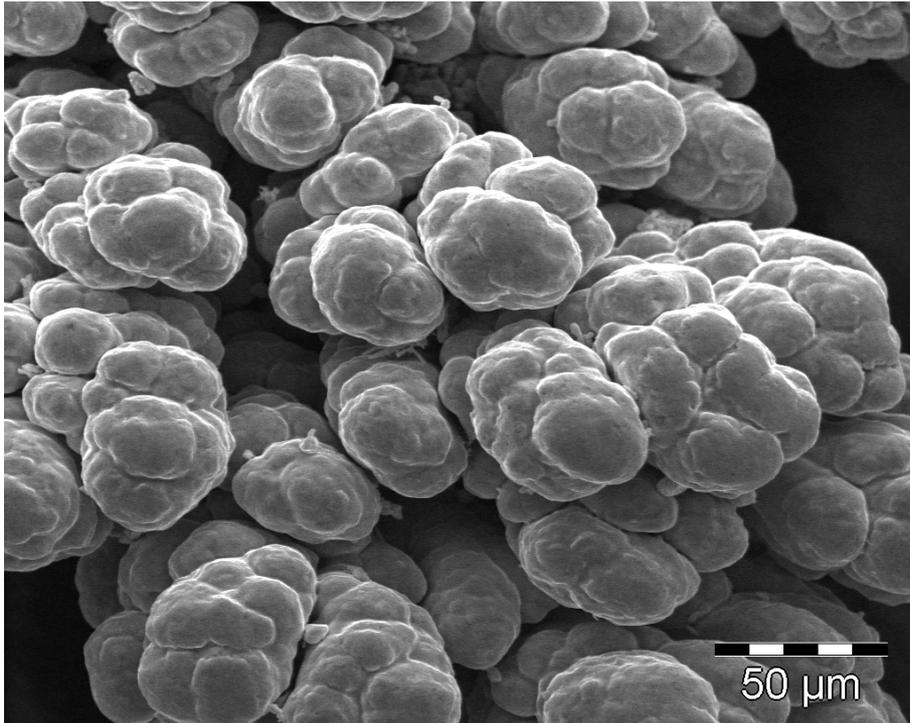


Abb. A.A7.1: Kupferpulver, lose (500:1)

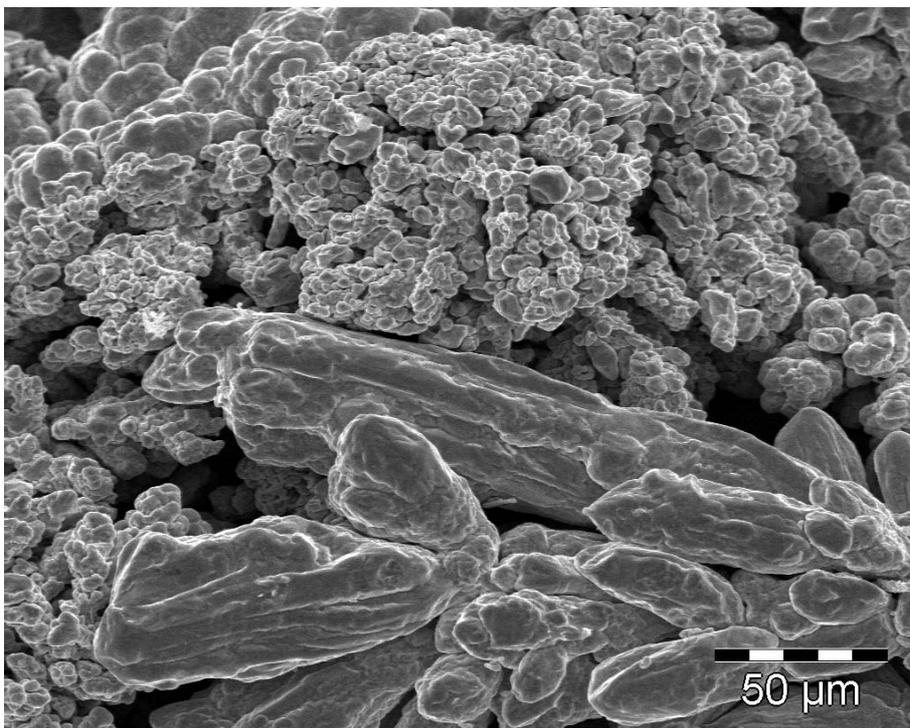


Abb. A.A7.2: Kupferpulver, Verpressung mit 0,9 t (30:1)

Vergleicht man die Bilder mit gleicher Vergrößerung, stellt man fest, dass bei der kleinsten Vergrößerungsstufe einzelne Körner im Gemenge der Verpressung nicht identifizierbar sind. Je höher die Vergrößerung, desto deutlicher zeigt sich auch hier, dass die Kornstruktur sehr ähnlich geblieben ist, d.h. dass in den betrach-

teten Bildausschnitten eine Verformung der Körner nicht nachgewiesen werden kann.

ZUSAMMENFASSUNG

Auf Grund des Umstandes, dass die verwendeten Pulver als stark dentritisch bezeichnet werden dürfen, wurde erwartet, dass die zur Probenerzeugung aufgewendeten hohen Kräfte die zarten Verästelungen in der Pulverstruktur deutlich sichtbar verformen.

Die festgestellte Verformung kann als eher geringfügig bezeichnet werden.

Es hat sich gezeigt, dass sich die Verästelungen der Pulverkörner ineinander schieben um so das Pulver zusammen zu halten.

In diesem Zusammenhang ist ein weiterer Umstand interessant: beim Brechen der untersuchten Prüflinge sind diese nicht genau in der Mitte der Probe zerbrochen. Offenbar gibt es bezogen auf die Länge der erzeugten Proben Stellen mit geringerer Festigkeit, da diese jeweils etwa in Teile mit 60 % bzw. 40 % der gesamten Länge zerfallen sind. Dabei war der kürzere Teil immer derjenige, dessen Unterseite am Unterstempel der Presse situiert gewesen ist. Andererseits wurde weiter oben⁴ bei den Messungen mit der Wirbelstromsonde gezeigt, dass es über die Länge der Probe gesehen etwa bei der oben erwähnten Bruchstelle das Maximum des spezifischen Widerstandes liegt.

EINE WEITERE BETRACHTUNG ZUR FESTIGKEIT

Es ist aus metallurgischen Untersuchungen bekannt, dass bei reinen Metallen, bezogen auf die durch das Kristallwachstum entstehenden Korngrenzen, an den Korngrenzen die Festigkeit höher ist als im Metallkristall selbst. Daher gilt allgemein, dass feinkörniges Metall auf Grund seines höheren Anteils an Korngrenzen bei gleichem Rauminhalt eine höhere Festigkeit besitzt (vgl. [Kau85]).

Vergleicht man unsere Aufnahmen der lose geschütteten unterschiedlichen Pulver im Maßstab 1:30, sind nur geringe Unterschiede des Aussehens bei den beiden

⁴ Kapitel 5

Kupferpulvern und ein etwas größerer Unterschied zum Eisenpulver festzustellen⁵. Insgesamt ist jedoch die Korngröße aller Pulver annähernd gleich, d.h. es existiert ein prozentuell nur sehr kleiner Pulveranteil außerhalb der Nennkorngröße von 250 µm.

Wenigstens die Dichte des Stampfkontaktes könnte durch das Zulassen eines Feinanteils im jeweils angewendeten Pulver gesteigert werde. Die Vermutung liegt nahe, dass auch Festigkeit und der spezifische Widerstand dadurch positiv beeinflusst werden können.

⁵ Es wäre noch zu beweisen, ob nach dem Vertauschen der Pulver diese nur auf Grund des Aussehens durch die Bilder noch einwandfrei zuordenbar wären.

B. AUFGABEN DES STAMPFCONTROLLERS

In Abbildung B.1 ist die bereits 2. Generation der Mikrocontroller-Plattform beschrieben, die gegenüber der Vorgängerversion erweitert worden ist. Die Klemmenreihen (oben und unten) dienen für die Anschlüsse der Sensoren und Aktuatoren bzw. für die Versorgungsspannungen. Der Stecker an der oberen Klemmenreihe dient dem Anschluss für die Programmierschnittstelle, die Steckerreihe in der Bildmitte erlauben die Erweiterung zusätzlicher Ein- oder Ausgabefunktionen und werden für diese Anwendung nicht benötigt. Auf die freien Sockel können zwei unterschiedliche Prozessoren eingesetzt werden, wobei für diese Anwendung der größere Prozessor Verwendung findet.

Die nachfolgende Beschreibung der Anschlüsse erläutert die Funktion und ist der Beschreibung der Arbeitsschritte für die nachträgliche Umrüstung einer bestehenden Anlage entnommen [Kuc02]. Dabei ist unter „von Ausgang bzw. von Eingang SPS“ jene Hauptsteuerung gemeint, die das SPS-Programm der umzurüstenden Maschine enthält.

„Versorgungsspannung Controller: + 24 VDC (direkt) an Klemme 1, - an Klemme 3 (obere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Ventil: + 24 VDC von Ausgang der SPS an Klemme A (untere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Stampfen fertig: + 24 VDC (direkt) an Klemme C (untere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Zählimpulse: + 24 VDC von Ausgang der SPS an Klemme E (untere Klemmenreihe)

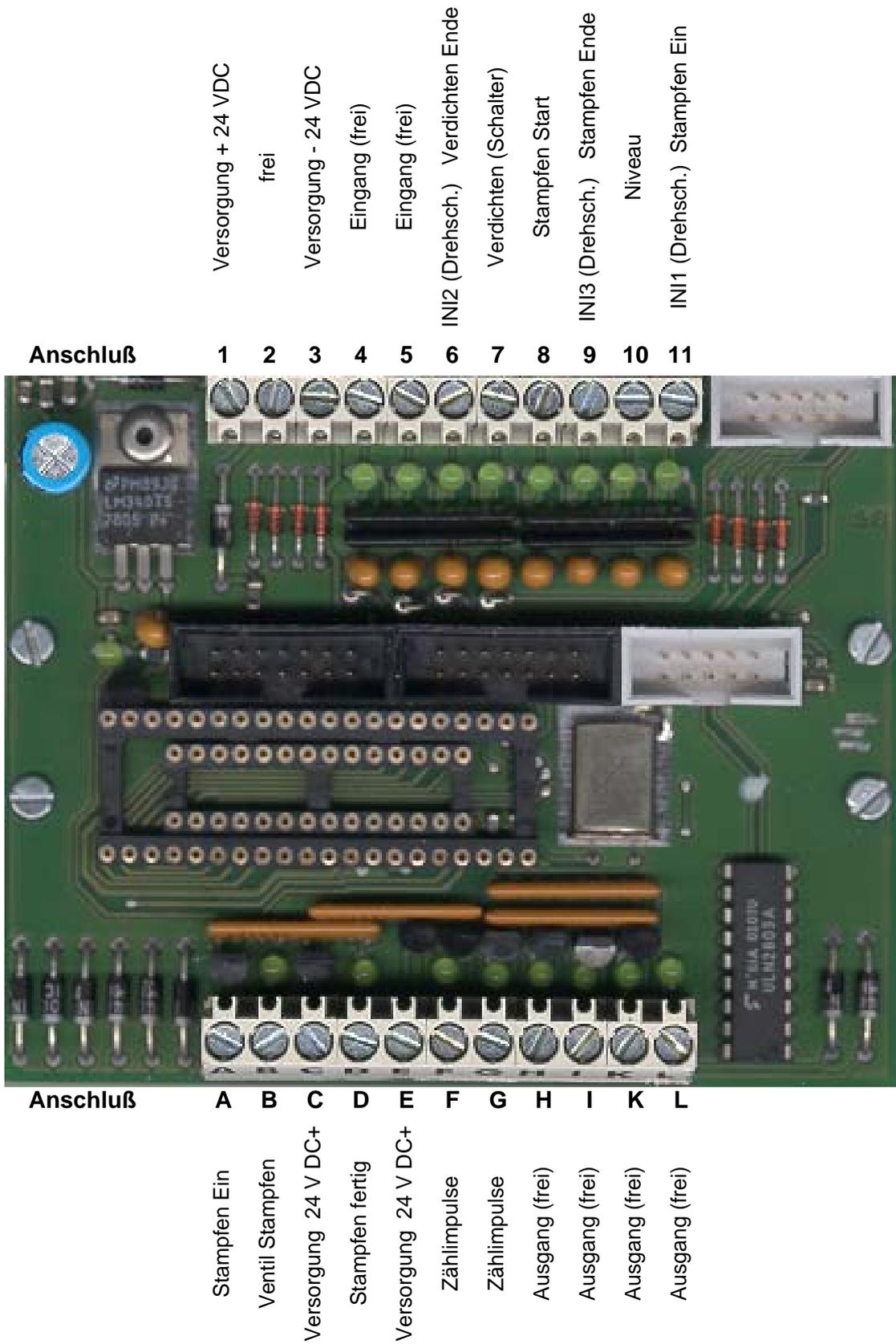


Abb. B.1: Stampfcontroller

Versorgungsspannung Controller: + 24 VDC (direkt) an Klemme 1, - an Klemme 3 (obere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Ventil: + 24 VDC von Ausgang der SPS an Klemme A (untere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Stampfen fertig: + 24 VDC (direkt) an Klemme C (untere Klemmenreihe)

Versorgungsspannung Zählimpulse: + 24 VDC von Ausgang der SPS an Klemme E (untere Klemmenreihe)

Eingänge:

Initiator am Drehschieber (INI1) an Klemme 11 (obere Klemmenreihe). Funktion: Freigabe des Ausganges an das Ventil für die Stampfimpulse, abhängig von der Stellung des Drehschiebers.

Initiator Niveau an Klemme 10 (obere Klemmenreihe). Funktion: Niveauüberwachung (wie bisher)

Initiator am Drehschieber (INI3) an Klemme 9 (obere Klemmenreihe). Funktion: Sperre des Ausganges an das Ventil für die Stampfimpulse, abhängig von der Stellung des Drehschiebers

Anforderung für Stampfen Start an Klemme 8 (obere Klemmenreihe) = Ausgang von SPS. Funktion: erst wenn vom Ablauf „Stampfen Start“ gefordert wird, erfolgt die Abtastung der Drehschieberstellungen für die Freigabe und bei Beendigung die Sperre des Ventils für den Stampfvorgang.

Wahlschalter für Verdichten an Klemme 7 (obere Klemmenreihe). Dieser Eingang wird nur bei Bedarf angeschlossen. Funktion: beim letzten Schlag wird die Impulslänge für das Ventil verkürzt (Verdichtungsschlag ohne Pulverzufuhr).

Initiator am Drehschieber (INI2) an Klemme 6 (obere Klemmenreihe). Dieser Eingang wird nur bei Bedarf angeschlossen. Funktion: Sperre des Ausganges an das Ventil für die Stampfimpulse bei der Betriebsart „mit Verdichtungsschlag“, abhängig von der Stellung des Drehschiebers

Bitte achten Sie beim Anschluss auf die Reihenfolge der Initiatoren am Drehschieber. Die Reihenfolge ist im Drehsinn des Drehschiebers angegeben (INI1 bis INI3) und muss entsprechend der Funktion dieser Initiatoren eingehalten werden.

Ausgänge:

Ventil für die Stampfimpulse an Klemme B (untere Klemmenreihe). Funktion: Freigabe des Drehschiebers (Der Ausgang ist in Reihe mit der Anforderung „Stampfen Start“ von der SPS geschaltet).

Stampfen fertig an Klemme D (untere Klemmenreihe). Funktion: Meldung an die SPS, dass Stampfvorgang beendet ist (Niveauüberwachung).

Zählimpulse an externe Schlagzahlzählung an Klemme G (untere Klemmenreihe). Dieser Ausgang wird nur bei Bedarf angeschlossen. Funktion: Zählimpulse geformt. Alternativ kann auch die Klemme F für ungeformte Zählimpulse verwendet werden.“

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1	Stampfkontakte, angeschliffen	3
Abb. 1.2	Zeichnung eines Handwerkzeuges	3
Abb. 1.3	Fertigung eines Stampfkontaktes mit einer Pressvorrichtung	4
Abb. 1.4	Prinzip 1 der Reihenmaschine	6
Abb. 1.5	Prinzip 2 der Reihenmaschine	7
Abb. 1.6	Prinzip 3 der Reihenmaschine	8
Abb. 1.7	Prinzip der Rundtischmaschine	9
Abb. 1.8	Lackstation (lineare Förderung der Kohlen)	11
Abb. 1.9	Stampfkopf	14
Abb. 1.10a	zufällig verteilte Werkstoffteilchen	22
Abb. 1.10b	seriell verteilte Werkstoffteilchen	23
Abb. 1.10c	parallel verteilte Werkstoffteilchen	24
Abb. 1.11	Niveauschalter	31
Abb. 4.1	Bewegungen des Stampfzylinders	41
Abb. 4.2	Modell des Stampfkopfes	44
Abb. 4.3	Schaltung 1	45
Abb. 4.4	Schaltung 2	48
Abb. 4.5	Modell für die Schlagbewegung	50
Abb. 4.6	Weg/Zeitdiagramm einer Schlagbewegung	53
Abb. 4.7	Modell für die Hubbewegung	55
Abb. 4.8	Modell einer Prüfkohle	57
Abb. 4.9	Halbleiter Drucksensor	58
Abb. 4.10	Versuchaufbau zur Kräftebestimmung	59
Abb. 4.11	Aufzeichnung einer Fallbewegung aus 200 mm Höhe	61
Abb. 4.12	Statisches Aufsetzen einer Masse	62
Abb. 4.13	Modell des Stampfkontaktes	63
Abb. 4.14	Stampfkontakt (Schnitt)	65
Abb. 5.1	Drehschieber Hauptluftkanäle	68
Abb. 5.2	Drehrichtung des Drehschiebers im Uhrzeigersinn	70
Abb. 5.3	Drehrichtung des Drehschiebers gegen den Uhrzeigersinn	70
Abb. 5.4	Zeitverzögerung Ventil-Zylinder	74
Abb. 5.5	Schlagbewegung ohne Zugfedern	75
Abb. 5.6	Einfluss der Zugfedern	77
Abb. 5.7	Aufzeichnung von Messergebnissen	78
Abb. 5.8	Sensoren am Stampfkopf	79
Abb. 5.9	Weg/Zeitdiagramm	81
Abb. 5.10	Lage der Abfragepunkte am Drehschieber	85

Abb. 5.11	Lage der Abfragepunkte am Drehschieber	87
Abb. 5.12	Messung (Potentiometereinstellung 4,5)	89
Abb. 5.13	Messung (Potentiometereinstellung 5)	90
Abb. 5.14	Messung (Potentiometereinstellung 5,8)	91
Abb. 5.15	Messung (Potentiometereinstellung 6,5)	91
Abb. 5.16	Maßpfeile für Messung von Abständen	94
Abb. 5.17	Messung (Potentiometereinstellung 4,5)	96
Abb. 5.18	Messung (Potentiometereinstellung 6)	96
Abb. 5.19	Messung (Potentiometereinstellung 7)	97
Abb. 5.20	Messung (Potentiometereinstellung 4,5)	99
Abb. 5.21	Messung (Potentiometereinstellung 5)	99
Abb. 5.22	Messung (Potentiometereinstellung 6)	100
Abb. 5.23	Messung (Potentiometereinstellung 7)	100
Abb. 5.24	Messung (Potentiometereinstellung 7)	103
Abb. 5.25	Messung (Potentiometereinstellung 7)	103
Abb. 5.26	Messung (Potentiometereinstellung 4,5)	104
Abb. 5.27	Messung (Potentiometereinstellung 4,5)	105
Abb. 5.28	Kurve	107
Abb. 5.29	Auswertung aus MR 1 (8 Hz)	108
Abb. 5.30	Auswertung aus MR 2 (8 Hz)	109
Abb. 5.31	Auswertung aus MR 3 (8 Hz)	110
Abb. 5.32	Auswertung aus MR 1 (9,1 Hz)	111
Abb. 5.33	Auswertung aus MR 1 (10,3 Hz)	112
Abb. 5.34	Auswertung aus MR 1 (11,4 Hz)	112
Abb. 5.35	Zeitverzögerungen Heben/Senken bei 8 Hz	113
Abb. 5.36	Zeitverzögerungen Heben/Senken bei 9,1 bis 11,4 Hz	114
Abb. 5.37	Federsatz D	116
Abb. 5.38	Federsatz C+D	116
Abb. 5.39	Federsatz C	117
Abb. 5.40	Schlagenergie mit/ohne Federn	118
Abb. 5.41	Einfluss der Federn auf die Schlagenergie	119
Abb. 5.42	Einfluss der Federn auf die mittlere Geschwindigkeit	119
Abb. 6.1	Pressentisch der 15 Tonnen-Pressen	123
Abb. 6.2	Kornformen von dentritischen Elektrolyt-Kupferpulvern	126
Abb. 6.3	20 Tonnen-Pressen	132
Abb. 6.4	Pulver in die Matrize einformen	133
Abb. 6.5	Ausstoßen des Prüflings	134
Abb. 6.6	Bedienung der Presse und Ablesen der Werte	135
Abb. 6.7	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 1	137
Abb. 6.8	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3	139
Abb. 6.9	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6	141

Abb. 6.10	Prüflinge, Verpressung mit 1,4 t	142
Abb. 6.11	Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver	143
Abb. 6.12	Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver	143
Abb. 6.13	Prozentuelle Verpressung der Stampfpulver Messreihe 1, linear interpoliert	144
Abb. 6.14	Messprinzip Voltmeter-Ampere-meter Verfahren	146
Abb. 6.15	Vorrichtung für Widerstandsmessung	147
Abb. 6.16	Messplatz für Widerstandsmessung	151
Abb. 6.17	Messpunkt an den Proben (Cu, Cu-Ag)	152
Abb. 6.18	Spezifischer Widerstand der Probe 4 (Cu-Ag)	153
Abb. 6.19	Spezifischer Widerstand der Probe 11 (Cu-Ag)	154
Abb. 6.20	Spezifischer Widerstand der Probe 8 (Cu-Ag)	155
Abb. 6.21	Differenz der spezifischen Widerstände der Proben 11 und 8	159
Abb. 6.22	Vorrichtung zur Aufnahme des Pulvers	160
Abb. 6.23	Messpunkte Widerstand des Eisenpulvers	162
Abb. 6.24	Messpunkte Widerstand des versilberten Kupferpulver	162
Abb. 6.25	Messpunkte Widerstand des wärmebehandelten Kupferpulvers	163
Abb. 6.26	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge	166
Abb. 6.27	Zugfestigkeit, Anzahl der Schläge	167
Abb. 6.28	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Cu)	170
Abb. 6.29	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Fe)	172
Abb. 7.1	Maschine S6, erstes Bild	177
Abb. 7.2	Maschine S6, zweites Bild	178
Abb. 7.3	Maschine S6, drittes Bild	179
Abb. 7.4	Maschine S9, Ende des Stampfvorganges	180
Abb. 7.5	Maschine S9, Ende des Stampfvorganges, geänderter Luftschlauch	181
Abb. 7.6	Lage der Abfragepunkte	182
Abb. 7.7	Versuchsschaltung 1 für Stampfen ohne Drehschieber	185
Abb. 7.8	Ausschnitt des Bewegungsablaufes beim Stampfvorgang	186
Abb. 7.9	Ausschnitt einer Bewegung beim Stampfvorgang	187
Abb. 7.10	Versuchsstampfung mit langer Füllzeit	189
Abb. 7.11	Versuchsschaltung Stampfcontroller neu	191
Abb. A.A1.1	Eisenpulver, lose (30:1)	208
Abb. A.A1.2	Eisenpulver, lose (200:1)	209
Abb. A.A1.3	Eisenpulver, lose (500:1)	209
Abb. A.A2.1	versilbertes Kupferpulver, lose t (30:1)	210
Abb. A.A2.2	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (30:1)	210
Abb. A.A2.3	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (30:1)	211

Abb. A.A3.1	versilbertes Kupferpulver, lose (200:1)	211
Abb. A.A3.2	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (200:1)	212
Abb. A.A3.3	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (200:1)	212
Abb. A.A4.1	versilbertes Kupferpulver, lose (500:1)	213
Abb. A.A4.2	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 0,6 t (500:1)	213
Abb. A.A4.3	versilbertes Kupferpulver, Verpressung mit 1,4 t (500:1)	214
Abb. A.A5.1	Kupferpulver, lose t (30:1)	215
Abb. A.A5.2	Kupferpulver, Verpressung mit 0,9 t (30:1)	215
Abb. A.A6.1	versilbertes Kupferpulver, lose (500:1)	216
Abb. A.A6.2	Kupferpulver, lose (30:1)	216
Abb. A.A7.1	Kupferpulver, lose (500:1)	217
Abb. A.A7.2	Kupferpulver, Verpressung mit 0,9 t (30:1)	217
Abb. B.1	Stampfcontroller	221

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1	Materialwerte	22
Tab. 5.1	Drehschieber Hauptluftkanäle	67
Tab. 5.2	Analyse des Drehschiebers	69
Tab. 5.3	Belüftung (Drehschieber)	71
Tab. 5.4	Zeitverzögerung Zylinder	72
Tab. 5.5	Zeit-Zylinder	73
Tab. 5.6	Zylinderbewegung	74
Tab. 5.7	Schaltwinkel Initiatoren	84
Tab. 5.8	Schaltwinkel und Zeitdifferenzen	86
Tab. 5.9	Normierte Messpunkte Zylinderbewegung und Schaltpunkte von Sensoren	87
Tab. 5.10	Messergebnisse aus Abb. 5.12	92
Tab. 5.11	Messergebnisse aus Abb. 5.13	93
Tab. 5.12	Messergebnisse aus Abb. 5.14	93
Tab. 5.13	Messergebnisse aus Abb. 5.15	93
Tab. 5.14	Messergebnisse aus Abb. 5.17	97
Tab. 5.15	Messergebnisse aus Abb. 5.18	98
Tab. 5.16	Messergebnisse aus Abb. 5.19	98
Tab. 5.17	Messergebnisse aus Abb. 5.20	101
Tab. 5.18	Messergebnisse aus Abb. 5.21	101
Tab. 5.19	Messergebnisse aus Abb. 5.22	101
Tab. 5.20	Messergebnisse aus Abb. 5.23	102
Tab. 5.21	Messergebnisse aus Abb. 5.24	104
Tab. 5.22	Messergebnisse aus Abb. 5.25	104
Tab. 5.23	Messergebnisse aus Abb. 5.26	105
Tab. 5.24	Messergebnisse aus Abb. 5.27	105
Tab. 5.25	Zusammenstellung der Frequenzen	106
Tab. 5.26	Zeitunterschied 1	108
Tab. 5.27	Zeitunterschied 2	109
Tab. 5.28	Zeitunterschied 3	110
Tab. 5.29	Zeitunterschied 4	111
Tab. 5.30	Zeitunterschied 5	112
Tab. 5.31	Zeitunterschied 6	113
Tab. 6.1	Messergebnisse Stampfpulver Nr. 1	125
Tab. 6.2	spezifische Gewichtskraft	126
Tab. 6.3	Messergebnisse Stampfpulver Nr. 3	127
Tab. 6.4	Messergebnisse Gewichte der Proben Stampfpulver Nr. 3	128

Tab. 6.5	Messergebnisse Stampfpulver Nr. 6	129
Tab. 6.6	Messergebnisse Gewichte der Proben Stampfpulver Nr. 6	130
Tab. 6.7	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 1	136
Tab. 6.8	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3	138
Tab. 6.9	Messergebnisse 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6	140
Tab. 6.10	Spezifischer Widerstand der Proben (Fe)	148
Tab. 6.11	Spezifischer Widerstand der Proben (Cu, Cu-Ag)	148
Tab. 6.12	Spezifischer Widerstand der Probe 4 (Cu-Ag) Länge: 18,54 mm	152
Tab. 6.13	Spezifischer Widerstand der Probe 11 (Cu-Ag) L: 16,24 mm	154
Tab. 6.14	Spezifischer Widerstand der Probe 8 (Cu-Ag) Länge: 15,33 mm	155
Tab. 6.15	Widerstandswerte 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 3	157
Tab. 6.16	Widerstandswerte 2. Messreihe, Stampfpulver Nr. 6	158
Tab. 6.17	Widerstand der Pulver (Cu-Ag, Fe)	161
Tab. 6.18	Widerstand der Pulver (Cu wärmebehandelt, Cu-Ag, Fe)	163
Tab. 6.19	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge	165
Tab. 6.20	Zugfestigkeit, Anzahl der Schläge	167
Tab. 6.21	Übergangs Widerstandswerte, Alterung nach 18 Stunden	168
Tab. 6.22	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Cu)	169
Tab. 6.23	Übergangs Widerstandswerte, Anzahl der Schläge (Fe)	171

LITERATURVERZEICHNIS

- [Wal94] Walcher, W.: Praktikum der Physik, Teubner, 1994, ISBN 3-519-13038-6
- [DIN221] DIN-Taschenbuch 221: Kohlenstoffmaterialien Eigenschaften, Anforderungen, Prüfungen, Beuth 1989, ISBN 3-410-12372-5
- [ISO9001] Qualitätsmanagementsysteme Anforderungen ISO 9001: 2000
- [Tag85] Taguchi, G., And Wu, Y.: Introduction to Off-Line Quality Control, Central Japan Quality Control Association, Japan, 1985
- [Tag90] Taguchi, G., And Clausing, D.: Robust Quality Harvard Business Review, 65-75, USA, 1990
- [Blä01] Bläsing (Hrsg.), Jürgen P., Lau, Bernd: DoE Design of Experiments nach Taguchi, TQU Verlag, 2001
- [Kuc98] Kucera, G.: Die Entwicklung einer speicherprogrammierbaren Steuerung, Diplomarbeit I an der FernUniversität Hagen im integrierten Studiengang Elektrotechnik, 1998
- [Kuc02] Kucera, G.: Stampfcontroller.doc, Einbau und Funktion des Stampfcontrollers, Einbau- und Inbetriebnahmeanweisung, 2002
- [Fur60] Furtak, F.: Die Lebensdauer von Kohlebürsten und anderen Kunstkohle-Erzeugnissen, Schunk & Ebe GmbH Giessen, 1960
- [Kau85] Kauczor, E.: Metall unter dem Mikroskop. Einführung in die metallographische Gefügelehre. 5. überarbeitete Auflage. Springer-Verlag 1985, ISBN 3-540-15611-9.
- [DI04.0997] DI-SORIC GmbH: Datenblatt 04.0997, D-73660 Urbach
- [DI27.0998] DI-SORIC GmbH: Datenblatt 27.0998, D-73660 Urbach
- [Gou700] Gould Instrument Systems Limited: Gould DataSYS 700 Digitale Speicheroszilloskope, Bedienungsanleitung, 1993
- [Bo95] Bosch, Abt. FMG 3: Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes von Kohlebürsten mit der Wirbelstromsonde (vorläufige Prüfvorschrift), PVA 5193, 1995

- [Sch95] Schunk Prüfvorschrift Gruppe 116 Nr. 5601: Prüfung des spezifischen Widerstandes von metallhaltigen Kohlebürsten, 1995