

**Beitrag zur Überwachung des thermischen  
Spritzprozesses mittels  
Schallemissionsanalyse (SEA)**

Der Fakultät Maschinenbau  
der Universität Dortmund  
zur Erlangung eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte  
Dissertation

von

**Dipl.-Ing. Gerd Reuss**

aus Düsseldorf

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juli 2001

## 1 Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | INHALTSVERZEICHNIS   | 2  |
| 2     | ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN  | 4  |
| 3     | EINLEITUNG   | 6  |
| 4     | STAND DER TECHNIK  | 8  |
| 4.1   | Thermische Spritztechnik   | 8  |
| 4.2   | Einfluß der nicht on-line regelbaren Prozeßparameter   | 10 |
| 4.3   | Überwachung und Regelung des thermischen Spritzprozesses   | 12 |
| 4.4   | Schallemissionsanalyse (SEA)   | 14 |
| 4.4.1 | Bewertung von SE-Signalen  | 15 |
| 4.4.2 | Signalüberlagerung   | 18 |
| 4.4.3 | Anwendung der SEA  | 19 |
| 4.5   | Fazit aus dem Stand der Technik  | 21 |
| 5     | ZIEL   | 23 |
| 6     | ENTSTEHUNG VON SCHALLEMISSION WÄHREND DES THERMISCHEN SPRITZENS                                  | 24 |
| 6.1   | Signalüberlagerung   | 24 |
| 6.2   | Berechnung der Partikelrate  | 24 |
| 6.3   | Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Meßfläche   | 25 |
| 7     | MEßTECHNIK ZUR AUFNAHME VON SE-SIGNALEN  | 29 |
| 7.1   | On-Line Erfassung der Charakteristika des Zeitsignals  | 29 |
| 7.2   | Kontinuierliche Abspeicherung von Zeitsignalen   | 30 |
| 7.3   | Auswahl der SE-Sensoren  | 30 |
| 7.3.1 | Elektromagnetische Störsignale   | 33 |
| 7.3.2 | Dunnegan 373   | 34 |
| 7.3.3 | Minhorst 2 MHz   | 36 |
| 7.3.4 | Panometrics 1 MHz  | 37 |
| 7.3.5 | Sonatest RP25HS-1 Rollsensor   | 39 |
| 7.3.6 | Ergebnis der Sensorauswahl   | 40 |
| 8     | GRUNDLEGENDE VORUNTERSUCHUNGEN   | 41 |
| 8.1   | Versuchsaufbau und –durchführung beim Lichtbogenspritzen   | 41 |
| 8.2   | Einfluß von On-line-Prozeßparametern auf die Entstehung der SE-Signale                           | 42 |
| 8.3   | Nachweis typischer Prozeßfehler auf Basis der SE-Signale beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen | 46 |

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 9     | ERWEITERUNG DER METHODIK ZUR SE-MESSUNG DIREKT AM BAUTEIL   | 50  |
| 9.1   | Ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung beim APS  | 54  |
| 9.2   | Betrachtung der Zeitsignale                                 | 54  |
| 9.3   | Einfluß von On-line-Prozeßparametern                        | 55  |
| 9.3.1 | Schmalbandige Auswertung der SE-Signale                     | 57  |
| 9.3.2 | Betrachtung des Frequenzspektrums                           | 59  |
| 9.3.3 | Einfluß der Bauteilgeometrie auf das Frequenzspektrum       | 61  |
| 9.3.4 | Test auf Normalverteilung der Frequenzspektren              | 62  |
| 9.3.5 | Bauteil- und werkstoffunabhängige Frequenzspektren          | 65  |
| 9.3.6 | Untersuchung verschiedener Bauteilgeometrien                | 73  |
| 9.3.7 | Einfluß der Position der Spritzpistole                      | 81  |
| 9.4   | Einfluß der nicht on-line regelbaren Prozeßparameter        | 82  |
| 9.4.1 | Wirkung der Musterfehler auf die Schichtentstehung          | 87  |
| 9.4.2 | Auswertung der Frequenzspektren                             | 89  |
| 9.5   | Einsatz von Neuronalen Netzes zur Bewertung von SE-Spektren | 92  |
| 9.5.1 | Nachweis von On-line-Prozeßparametern                       | 94  |
| 9.5.2 | Nachweis nicht on-line regelbarer Prozeßparameter           | 96  |
| 9.5.3 | Trainingszeiten   | 98  |
| 10    | KONSEQUENZEN  | 101 |
| 10.1  | SE-Messung über Wellenleiter                                | 101 |
| 10.2  | SE-Messung am Bauteil                                       | 103 |
| 11    | AUSBLICK UND ZUSAMMENFASSUNG                                | 108 |
| 12    | QUELLCODES  | 109 |
| 12.1  | Übersicht Auswerteprogramm                                  | 109 |
| 12.2  | Daten lesen und Datenverarbeitung                           | 110 |
| 12.3  | Berechnung von RMS-Wert und von der Einhüllenden            | 111 |
| 12.4  | Berechnung des 3D-Plots                                     | 111 |
| 12.5  | Berechnung der Normalverteilung                             | 112 |
| 13    | LEBENS LAUF   | 113 |
| 14    | LITERATUR   | 114 |

**2 Abkürzungen und Formelzeichen**

|                  |   |
|------------------|---|
| $\alpha$         | Adaptionsfaktor                                 |
| $\vec{x}$        | Eingabevektor                                   |
| $\vec{w}$        | Gewichtsvektor                                  |
| $\dot{m}$        | Massenfluß [kg/s]                               |
| $\rho$           | Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]                     |
| $\mu$            | Erwartungswert (geschätzt)                      |
| $\sigma$         | Standardabweichung                              |
| $\Phi$           | standardisierte Normalverteilung                |
| $\lambda$        | Wellenlänge [m]                                 |
| A                | Amplitudenwert des Zeitsignals                  |
| a                | Erwartungswert                                  |
| A/D              | Analog/Digital                                  |
| $a_m$            | oberer Klassengrenze (standardisiert)           |
| $A_{\max}$       | Maximal-Amplitude des SE-Signals (Zeitsignal)   |
| APS              | atmosphärisches Plasmaspritzen                  |
| c                | Schallgeschwindigkeit                           |
| d                | mittlerer Teilchendurchmesser [m]               |
| f                | Eigenfrequenz                                   |
| FFT              | Fast Fourier Transformation                     |
| $F_i$            | i-tes Frequenzspektrum (Amplitudenspektrum)     |
| $F_{\text{mit}}$ | mittleres Frequenzspektrum (Amplitudenspektrum) |
| HGP              | Hochgeschwindigkeitspyrometrie                  |
| $h_m$            | absolute Häufigkeit                             |
| I                | Stromstärke [A]                                 |
| l                | Bauteilabmessung [m]                            |
| LDA              | Laser-Doppler-Anemometrie                       |
| m                | Partikelmasse [kg]                              |
| n                | Index   |
| $o_m$            | obere Klassengrenze                             |
| p                | Partikelrate [s <sup>-1</sup> ]                 |
| PFI              | Particle Flux Imaging                           |
| q                | Anzahl Freiheitsgrade                           |
| r                | Korrelationskoeffizient                         |

---

|       |  |
|-------|--|
| RMS   | Root Mean Square                                   |
| s     | Spritzabstand [m]                                  |
| SE    | Schallemission                                     |
| SEA   | Schallemissionsanalyse                             |
| t     | Zeit [s]   |
| $T_D$ | mittlere Signaldauer [s]                           |
| U     | Spannung [V]                                       |
| $u_m$ | untere Klassengrenze                               |
| V     | mittleres Partikelvolumen [m <sup>3</sup> ]        |
| v     | Geschwindigkeit [m/s]                              |
| $v_0$ | Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Aufprall [m/s] |

### 3 Einleitung

Durch das Beschichten von Bauteilen mit den Verfahren des thermischen Spritzens werden deutlich verbesserte Oberflächeneigenschaften erreicht. Beispielsweise kann die Verschleißfestigkeit erhöht und die Beständigkeit gegenüber Korrosion verbessert werden /1,2/. Darüber hinaus erlauben Wärmedämmschichten den Bauteileinsatz bei höheren Temperaturen und ermöglichen so die Steigerung des Wirkungsgrades bei bestimmten Prozessen /3/.

In Zeiten von zunehmender Rohstoffverknappung bieten die Verfahren des thermischen Spritzens eine sowohl ökologische als auch ökonomische Möglichkeit zur Optimierung von Bauteileigenschaften. Durch das Aufbringen der sehr dünnen Schichten (100-1000  $\mu\text{m}$ ) gelingt die Verbesserung der Oberflächeneigenschaften bei gleichzeitiger Materialeinsparung. Zu den Verfahren des thermischen Spritzens zählen u.a. das Vakuumplasmaspritzen (VPS), das atmosphärische Plasmaspritzen (APS), das Lichtbogenspritzen und das Pulverflammspritzen /4/.

Prinzipiell laufen sämtliche Verfahren des thermischen Spritzens ähnlich ab. Der Beschichtungswerkstoff, meist in Pulver- oder Drahtform vorliegend, wird in einer Wärmequelle aufgeschmolzen. Als Wärmequellen stehen z.B. eine Flamme, ein Lichtbogen oder ein Plasma zur Verfügung; dabei können Temperaturen bis zu 20.000 K erreicht werden /5/. Nach dem Aufschmelzen des Beschichtungswerkstoffs wird dieser durch ein Trägergas beschleunigt und auf die Oberfläche des zu beschichtenden Bauteils geschleudert /6/. Dort erstarrt der Beschichtungswerkstoff und bleibt infolge von mechanischer Verklammerung und Diffusionsvorgängen am Grundmaterial haften /7,8/. Zur Verbesserung der Anbindung des Beschichtungswerkstoffs an das Grundmaterial wird die Oberfläche vor dem Beschichten durch Strahlen mit z.B. Korund oder Gußkies aufgerauht und damit energetisch aktiviert /9/. Typische Anwendungen für den Bereich des thermischen Spritzens sind Motorenteile aus Aluminium, Laufbuchsen aus Grauguß, Druckbehälter, Turbinenschaufeln und Walzen aus der Papierindustrie /10,11,12,13/.

Bei allen Verfahren des thermischen Spritzens kann die Prozeßstabilität nicht vollständig gewährleistet werden /14,15/. Diese muß jedoch in den nächsten Jahren erheblich gesteigert werden, wenn die thermische Spritztechnik bestehende Märkte

halten und zukünftige Anwendungen z.B. im Bereich des Motorensbaus erobern will. Gerade der Einsatz der thermischen Spritztechnik bei sehr lange andauernden Beschichtungsprozessen oder in der Serienfertigung erfordert robuste und sichere Fertigungsabläufe. Eine Möglichkeit zum Erreichen dieses Ziels besteht in der Entwicklung einer effizienten und praxisnahen Prozeßdiagnostik, so daß die Vorgänge während des Beschichtens zum einen überwacht und zum anderen besser verstanden werden können.

Der Grund für Prozeßschwankungen beim thermischen Spritzen liegt in einer Vielzahl nicht on-line regelbarer Prozeßparameter. Diese Parameter führen zu einer veränderten Materialaufschmelzung und kinetischen Energie der einzelnen Spritzpartikel. Dazu zählen z.B. der Düsenzustand, Schwankungen der Pulverförderrate sowie veränderte Pulvereinschußbedingungen. Die genannten, nicht on-line regelbaren Parameter sind kaum erfaßbar und darüber hinaus ist deren Einfluß bzw. Wechselwirkung untereinander nicht ausreichend geklärt. Die in kommerziellen (industriellen) Anlagen übliche Überwachung der Hauptprozeßparameter (Strom, Spannung, Gasdruck, Gasfluß usw.) gewährleistet keine stabile Prozeßführung.

Aus den dargestellten Gründen wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses auf der Basis der SEA entwickelt.

## 4 Stand der Technik

In der thermischen Spritztechnik existieren eine Vielzahl von Beschichtungsverfahren /16/. Beispielhaft wird in den nachfolgend beschriebenen experimentellen Untersuchungen auf zwei Verfahren eingegangen, auf das atmosphärische Lichtbogenspritzen und auf das atmosphärische Plasmaspritzen. Aus diesem Grund werden diese Verfahren hinsichtlich ihrer Technologie und Anwendung kurz beschrieben.

### 4.1 Thermische Spritztechnik

Das Lichtbogenspritzen wurde in den 50er Jahren dieses Jahrhunderts bis zum industriellen Einsatz hin entwickelt. Dieses Beschichtungsverfahren zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad aus und ist kostengünstig. Als Spritzwerkstoff dienen z.B. Fe-Legierungen (FeCrTi, FeCrAl, X15Cr 4 6, ), Ni-Legierungen (NiCr), unlegierter Kohlenstoffstahl, martensitischer rostfreier Stahl und Bronze /17,18,19/. Die Oberflächenschichten erzeugen eine hohe Beständigkeit gegen Verschleiß und Korrosion /20,21,22/. Als zu beschichtende Bauteile sind z.B. Papierwalzen, korrosionsbeständige Oberflächen im Schiffsbau, Druckbehälter in der Gas- und Ölindustrie, Turbinen, Lager, Pumpengehäuse, Förderleitungen im Kraftwerksbau sowie Rauchgaswege von Müllverbrennungsanlagen zu nennen /21,23,24,25,26/.

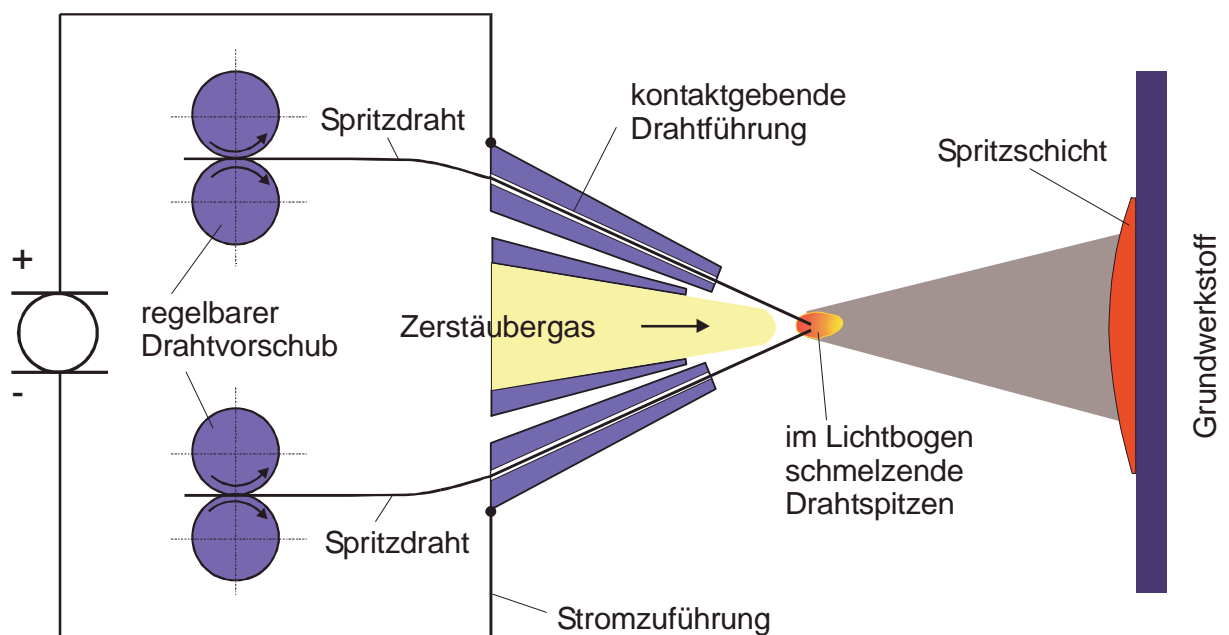


Abbildung 1: Prinzip atmosphärisches Lichtbogenspritzen /27/



Das Prinzip des atmosphärischen Lichtbogenspritzens (Abbildung 1) beruht auf dem Aufschmelzen der beiden Spritzdrähte im Lichtbogen und dem anschließenden Schleudern der Schmelze auf die Bauteiloberfläche mittels eines Gasstromes. Als Zerstäubergas wird Luft mit einem Druck im Bereich von 2 bar bis 7 bar eingesetzt. Die Schmelze wird durch den Gasstrom in feine Partikel zerstäubt.

Unter den Verfahren des thermischen Spritzens hat das atmosphärische Plasmaspritzen eine weite Verbreitung und eine große industrielle Bedeutung erlangt. Bedingt durch die hohen Prozeßtemperaturen erlaubt das atmosphärische Plasmaspritzen das Verarbeiten hochschmelzender, oxidkeramischer Werkstoffe, so daß Wärmedämmschichten bevorzugt mit dieser Technologie hergestellt werden. Darüber hinaus lassen sich Metalle, Carbide, Boride und Nitride mit diesem Verfahren verarbeiten /27,28/.

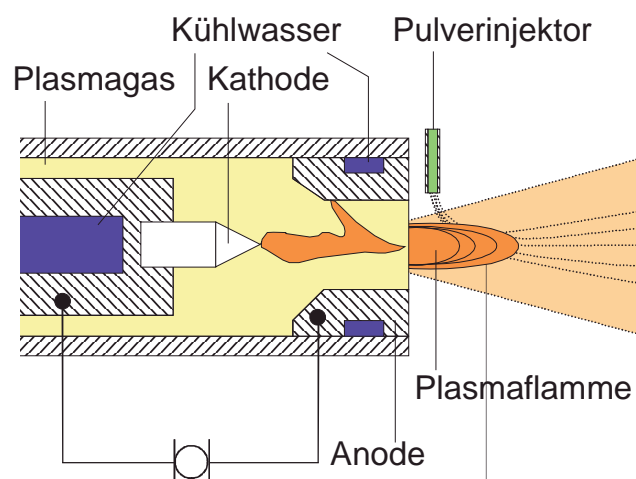


Abbildung 2: Prinzip atmosphärisches Plasmaspritzen /27/

Der Plasmasbrenner besteht aus einer stabförmigen Wolframkathode und einer ringförmigen Kupferanode (Abbildung 2). Zum Schutz vor thermischer Zerstörung werden beide Bauteile mit Wasser gekühlt. Als Plasmagase kommen hauptsächlich Argon, Helium, Wasserstoff, Stickstoff und deren Mischungen zum Einsatz. Auf dem Weg zur Düse passiert das Plasmagas den mittels Hochfrequenz gezündeten Lichtbogen, welcher zwischen Kathode und Anode brennt. Hier kommt es zum Anregen, Dissozieren und Ionisieren der Gasmoleküle bzw. Atome. Bei der Anregung werden außerdem Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben. Beim Rücksprung dieser Elektronen auf ihre ursprüngliche Bahn wird elektromagnetische Strahlung wie

z.B. sichtbares Licht oder UV-Strahlung emittiert. Darüber hinaus wird das Plasmagas stark erhitzt. Es expandiert, so daß ein hell leuchtender Plasmafreistrahler die Düse mit hoher Geschwindigkeit verläßt /28/.

#### 4.2 Einfluß der nicht on-line regelbaren Prozeßparameter

Beim thermischen Spritzen sind zwei Arten von Prozeßparametern zu unterscheiden:

- ◆ On-line-Prozeßparameter und
- ◆ nicht on-line regelbare Prozeßparameter.

On-line-Prozeßparameter sind - abhängig vom Spritzverfahren - z.B. Strom, Spannung, Gasvolumenstrom und Spritzabstand. Diese Parameter sind an kommerziellen (industriellen Anlagen) einstellbar und werden während des Spritzprozesses geregelt. Der Einfluß dieser Parameter auf den Prozeß und die entstehenden Schichten ist stark. Zu den nicht on-line regelbaren Prozeßparameter zählen beim atmosphärischen Plasmaspritzen z.B. der Zustand der Düse sowie die Pulverfördertrate. Der Einfluß der nicht on-line regelbaren Prozeßparameter wird im folgenden betrachtet. Diese hier beschriebene Begriffsdefinition gilt für die gesamten, in den folgenden Kapiteln gemachten Ausführungen.

Die Düse verschleißt durch die extrem hohen Gasgeschwindigkeiten und durch den wandernden Lichtbogen. Elektrode und Düse unterliegen einer Verschleißbeanspruchung infolge der Erosion verursacht durch den Lichtbogenansatzpunkt. Hierdurch wird deren ursprüngliche Kontur sukzessive zerstört. Insbesondere der Zündvorgang belastet das Material. Durch die Konturveränderung kommt es zu einer geringeren Strömungsaustrittsgeschwindigkeit der Plasmagase /29/.

Verschlossene Düsen führen zu veränderten Lichtbogenlängen und Strömungsverhältnissen. Dadurch erfolgt eine veränderte Plasmaausbildung, die Partikel werden nicht mehr optimal aufgeschmolzen und beschleunigt. Dies führt zu veränderten Pulvereinschußbedingungen mit sich.

Die Schwankung der Pulverfördertrate wird verursacht durch ungleichmäßig arbeitende Förderer, durch Pulververklumpungen infolge Feuchtigkeit sowie kurzzeitiges

Verstopfen der Pulverzuführungen. Dies kann zum einen zu einem geringeren Materialauftrag und im Extremfall zur Unterbrechung der Materialzuführung führen, zum anderen bringt dies einen schwankenden Pulvereinschuß mit sich. Die Partikel werden z.T. nicht vollständig aufgeschmolzen und die Schichtgüte verschlechtert sich.

Die Notwendigkeit einer Prozeßüberwachung wird durch die Versuchsergebnisse in Abbildung 3 dokumentiert. Dabei wurden mit der gleichen Beschichtungsanlage (METCO EG88 mit Pistole 9MB) und identischen On-line-Prozeßparametern (520 A Stromstärke, 50 g/min Pulverförderrate, 10/40 H<sub>2</sub>/Ar l/min Gasvolumenstrom, 80 mm Spritzabstand) Chromoxidschichten auf Baustahl mit dem Verfahren des atmosphärischen Plasmaspritzens an verschiedenen Versuchstagen aufgebracht. Das Ergebnis sind drei Schichten mit unterschiedlicher Schichtdicke, Porosität und Rauheit. Darüber hinaus sind in der unteren Schicht Risse zu erkennen.

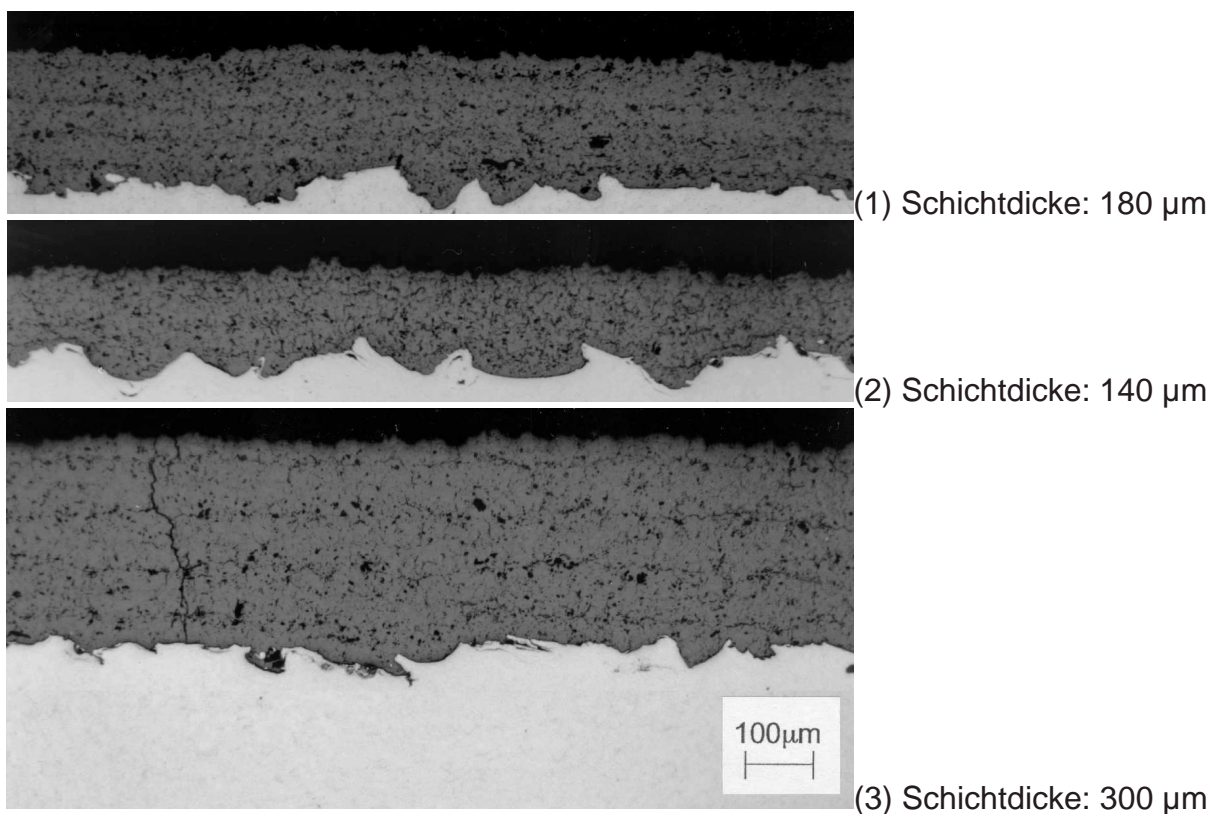


Abbildung 3: Chromoxidschichten auf Stahl hergestellt bei identischen On-line-Prozeßparametern (Querschliff): 520 A Stromstärke, 50 g/min Pulverförderrate, 10/40 H<sub>2</sub>/Ar l/min Gasvolumenstrom, 80 mm Spritzabstand, 4 Überläufe

### 4.3 Überwachung und Regelung des thermischen Spritzprozesses

In der industriellen Praxis findet bisher die Überwachung der On-line-Prozeßparameter, d.h. der regelbaren Parameter, statt. Darüber hinaus werden in Forschung und Entwicklung mehrere, z.T. recht aufwendige Verfahren zur Überwachung bzw. zur genauen Charakterisierung des Prozesses angewendet. Diese Verfahren werden jedoch mit dem Ziel eingesetzt, Vorgänge des Beschichtungsprozesses zu verstehen oder den Prozeß zu optimieren und nicht zum Aufbau eines Überwachungssystems oder einer Regelung /30/. Diese Vorgehensweise ist durchaus sinnvoll, da die Vorgänge im Plasmastrahl insbesondere in Hinsicht auf turbulente Prozesse noch nicht ausreichend erforscht sind /14/.

Derartige Forschungsarbeiten lassen sich in zwei Gruppen aufteilen. Erstens wird eine Variation der On-line-Prozeßparameter durchgeführt und die erzeugten Schichten mittels zerstörender und zerstörungsfreier Prüfmethode untersucht. Dazu zählen z.B. Haftzugversuche, Stift-Scheibe-Verschleiß, Taber-Abraser-Versuche, Rasterelektronenmikroskopie sowie röntgenographische Phasenanalysen /30,31/.

Zweitens wird der Plasmastrahl bzw. die Plasmaflamme untersucht, um Partikelgeschwindigkeiten, Temperaturverteilungen, Phasenumwandlungen sowie Partikelgrößen zu messen. Hierbei werden Verfahren wie Kalorimetrie, Infrarottechnik, Emissionsspektroskopie, Hochgeschwindigkeitspyrometrie (HGP), Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) und Phasen-Doppler-Anemometrie z.T. erfolgreich verwendet /15,31,32,33,34,35,36/. Weitergehende Untersuchungen beziehen zusätzlich die Zusammensetzung des Plasmagases mit in die Auswertung ein /37/. Als nachteilig erweisen sich bei den vorgestellten Methoden der erhebliche Zeitaufwand, die teure, empfindliche und komplizierte Meßtechnik und der Bedarf an hochqualifiziertem Bedienpersonal /40/. Aus diesem Grund eignen sich diese Methoden nicht zu einer Prozeßüberwachung.

Durchaus denkbar ist eine Prozeßüberwachung auf der Basis optischer Verfahren mit Doppelbelichtung, welche die Plasmageometrie, die quantitative Änderung der Strahlungsintensität und die Teilchengeschwindigkeit erfaßt /38,39/. Als weiteres optisches Verfahren ist die PFI(Particle Flux Imaging)-Diagnostik zu nennen. Die PFI-Diagnostik basiert auf der Tatsache, daß jedem Betriebszustand eine charakteristi-

sche Leuchtdichtevertelung des Plasmas sowie des Partikelstrahls zugeordnet ist. Abhängig von der ermittelten Leuchtdichte können Änderungen sowohl im Plasma als auch im Partikelstrahl erkannt werden /40/. Gerade auf dem Gebiet der optischen Verfahren bestehen z.Z. Bemühungen, eine Prozeßdiagnostik und darauf aufbauend eine Prozeßüberwachung zu etablieren. Ein Durchbruch ist jedoch bisher nicht gelungen, eine industrielle Anwendung in Form einer integrierten Prüfeinrichtung in eine Beschichtungsanlage ist nicht in Sicht.

Nahezu allen hier genannten Verfahren sind zwei Dinge gemeinsam. Zum einen sind die notwendigen Apparaturen so kostspielig, daß bereits die Überwachungseinrichtung den Preis einer kompletten Beschichtungsanlage übertrifft. Zum anderen werden durch die hochentwickelte Plasmadiagnostik nur das Plasma und die Spritzpartikel charakterisiert. Der Einfluß des Substrats und damit auch dessen Beschaffenheit hinsichtlich der Oberfläche und Temperatur wird nicht berücksichtigt.

Verschlossene Düsen führen zu veränderten Lichtbogenlängen; da die Spannung proportional zur Lichtbogenlänge ist, existieren hier Ansätze zur Überwachung bzw. Nachregelung des Spritzprozesses. Die Konstantstromquelle liefert unabhängig von der Spannung, die zwischen Düse und Elektrode anliegt, den vorgewählten Strom. Elektrode und Düse sollten beim Erreichen eines unteren minimalen Spannungswertes, der vom Hersteller vorgegeben wird, ausgetauscht werden /29/.

Der Spannungsverlust kann bei einigen Anlagen durch das Anpassen des Wasserstoffanteils kompensiert werden. Hierbei wird die Anlage im Konstantspannungsmodus betrieben. Durch Erhöhen des Wasserstoffanteils wird die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und der Lichtbogen weiter aus der Düse gedrückt, dies führt zu einer Spannungserhöhung. Nachteilig an der automatischen Spannungsnachregelung durch Wasserstoffzugabe ist die veränderte Wärmeleitfähigkeit, Viskosität und Geschwindigkeit des Plasmas. Eine weitere Möglichkeit ist der Konstantleistungsmodus, hierbei wird das Produkt aus Strom und Spannung konstant gehalten /29/.

Es wird deutlich, daß die bisher eingesetzten Methoden zur Prozeßüberwachung und zur Prozeßdiagnostik nicht geeignet sind, eine reproduzierbar hohe Schichtgüte beim industriellen Einsatz der thermischen Spritztechnik zu gewährleisten. Folglich müs-

sen andere Verfahren entwickelt bzw. angepaßt werden, die diese Anforderungen erfüllen können. Eine Möglichkeit zur Überwachung von Fertigungsprozessen besteht im Einsatz der Schallemissionsanalyse (SEA). Dieses Verfahren wird aus diesem Grund im folgenden näher betrachtet.

#### **4.4 Schallemissionsanalyse (SEA)**

Die Beanspruchungen eines Werkstoffes durch chemische, thermische oder rein mechanische Belastungen rufen mechanische Reaktionen im Werkstoffgefüge hervor. Diese Reaktionen sind Ursache für eine meist rasche Freisetzung von elastisch gespeicherter Energie, die sich vorwiegend als Wärme- und Schwingungsenergie äußert. Die Erfassung und Weiterverarbeitung der dann in festen Körpern entstehenden hochfrequenten Schallimpulse wird als Schallemissionsanalyse (SEA) bezeichnet. Im Gegensatz zu anderen ZfP-Verfahren ist die SEA passiv, d.h. sie ist stets darauf angewiesen, daß Vorgänge im zu prüfenden Bauteil hervorgerufen werden, die Schall emittieren. Zum Teil sind diese Vorgänge hörbar und deswegen seit langem bekannt, wie etwa das Zinngeschrei, das bei der Verformung von Zinn durch Hämmern oder Biegen entsteht /41/.

Die SEA hat sich, nachdem deren technische Nutzbarkeit in den fünfziger Jahren erstmals von J. Kaiser aufgezeigt wurde, ständig weiterentwickelt /42/. Durch den Einsatz der Mikroprozessortechnik können große Datenmengen gespeichert und schnell ausgewertet werden. Die SEA bietet gegenüber anderen ZfP-Verfahren die Möglichkeit "on-line" Gesamtkomponenten zu prüfen, d.h. direkt während einer Überprüfungs- oder Überwachungsphase ein Meßergebnis bzw. eine Aussage über das geprüfte Teil zu liefern. Mit Hilfe der SEA sind Vorgänge bis in Mikrobereich hinein nachweisbar. Durch den Einsatz moderner Analyse- und Ortungsverfahren können die Schallereignisse direkt ihrem Ursprungsort zugeordnet werden /43,44,45,46,47,48,49/.

Als Schallaufnehmer werden heute fast ausschließlich piezoelektrische Sonden verwendet, die mittels Koppelpaste an das Bauteil gepreßt oder geklebt werden. Unter Ausnutzung des piezoelektrischen Effekts wird die ankommende Schallwelle in ein elektrisches Signal umgewandelt, verstärkt und weiterverarbeitet /50/.

Während in den Anfängen der SEA die ersten systematischen SE-Messungen noch im Hörschallbereich durchgeführt wurden, wird heute weit höherfrequenter, etwa von 50 kHz bis zu 5 MHz, gemessen.

#### 4.4.1 Bewertung von SE-Signalen

Bei der SE lassen sich zwei Typen der Signalform unterscheiden, kontinuierliche und transiente SE-Signale (Abbildung 4).

Die kontinuierlichen SE-Signale sind rasch aufeinanderfolgenden statistisch ablaufenden Prozessen zuzuordnen, deren Signale nicht mehr getrennt werden können. Zur Auswertung von kontinuierlichen SE-Signalen wird häufig der RMS (Root Mean Square)-Wert des Zeitsignals angegeben.

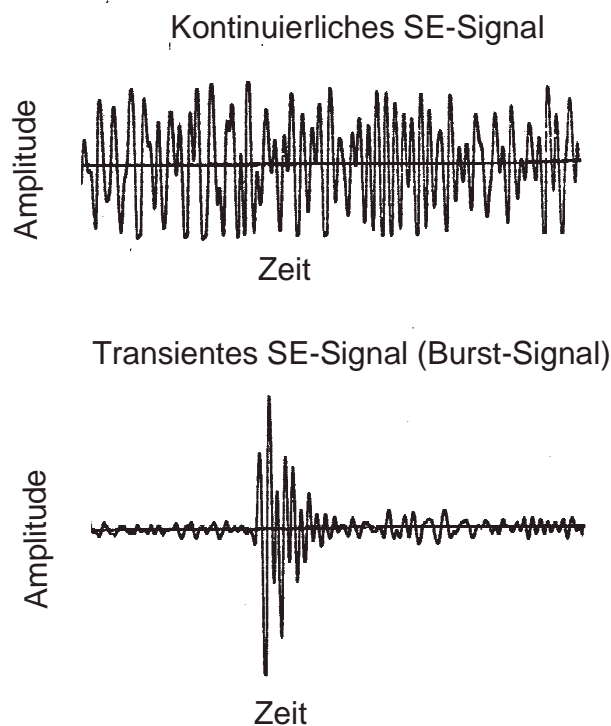


Abbildung 4: SE- Signalformen

Gleichung 1

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A^2}{n}}$$

RMS := Root Mean Square – Wert

n := Anzahl der Punkte des Zeitsignals, über die der RMS-Wert gebildet wird

A := Amplitudenwert des Zeitsignals

Burst-Signale entstehen bei diskreten Einzelereignissen, beispielsweise bei der Rißbildung. Das gemessene SE-Signal beschreibt nicht unbedingt den ursprünglichen Impuls, da dieser von der Schallausbreitung in der Probe und von der Charakteristik des Aufnehmers verändert wird.

Traditionell wird bei der SEA das Zeitsignal und nicht das Frequenzspektrum ausgewertet. Dies ist darin begründet, daß resonante und hochempfindliche Sensoren zum Nachweis von Werkstoffvorgängen eingesetzt werden, die nur geringe Energie in Form von mechanischen Schwingungen emittieren. Die Resonanz des SE-Sensors führt dazu, daß die aufgenommenen Spektren nahezu identisch mit dessen Eigenfrequenzspektrum sind. Somit enthält das Frequenzspektrum kaum Information über die Signalquelle. Die Verwendung solcher SE-Sensoren bleibt natürlich auch bei den Zeitsignalen nicht ohne Wirkung. Insbesondere das Abklingen der Signale wird zum größten Teil von den Sensoreigenschaften und nicht von Vorgängen im Bauteil bzw. im Werkstoff geprägt.

Liegen im Zeitbereich einzelne Burst-Signale vor, so werden diese nach in Richtlinien vorgegebenen Kriterien bewertet (Abbildung 5) /51/.

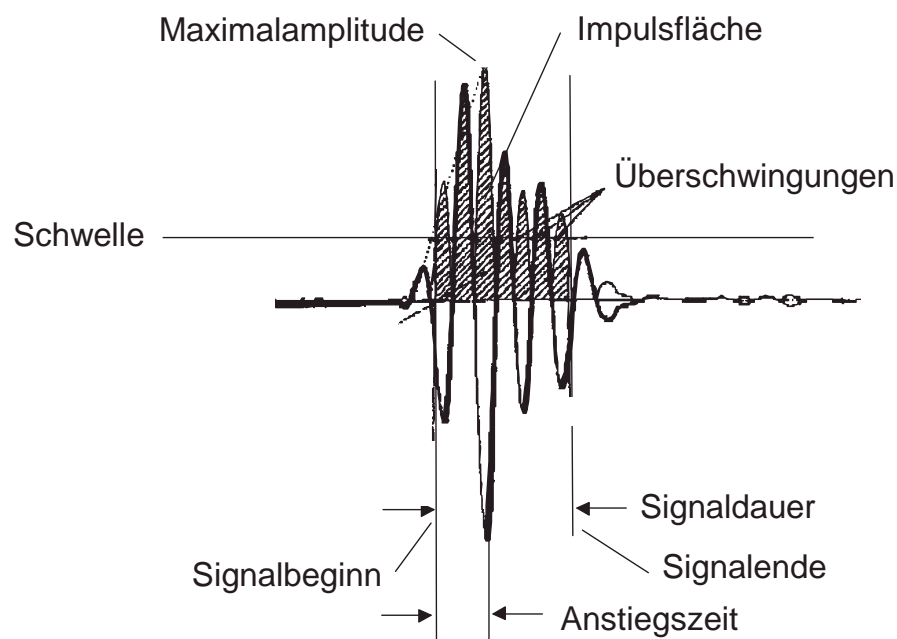


Abbildung 5: Merkmale zur Beschreibung von Burst-Signalen



Zunächst wird eine Schwelle in der SE-Meßapparatur fest eingestellt. Sobald diese Schwelle durch ein SE-Signal überschritten wird, beginnt die eigentliche Messung. Der Zeitpunkt des ersten Überschreitens der Schwelle ist der Signalbeginn. Wird die Schwelle für eine vorgegebene Zeitdauer unterschritten, so wird dem Zeitpunkt dieses Unterschreitens das Signalende zugeordnet. Diese einstellbare Zeitdauer ist größer als die Schwingungszeit, ansonsten würde jede einzelne Überschwingung als Signal gedeutet werden. Bei Echofolgen kann dies zu einer Fehlbestimmung in Form von großen Signaldauern führen: in Folge der Signalüberlagerung können Ausgangsignal und Echo ggf. nicht getrennt werden. Zur Bewertung von SE-Signalen werden mehrere Parameter bestimmt.

Bis auf die Maximalamplitude hängen alle anderen Parameter direkt von der eingestellten Schwelle ab. Ein Heraufsetzen der Schwelle verkürzt die Signaldauer, die Anstiegszeit, die Überschwingungen und die Impulsfläche. Auch die Ereignisrate wird durch diese Maßnahme berührt, da Signale mit geringer Amplitude nicht mehr registriert werden. Somit sind Messungen, welche mit unterschiedlichen Meßsystemen bzw. unterschiedlichen Einstellungen aufgenommen werden, ausschließlich qualitativ vergleichbar.

| <b>SE-Merkmal</b>                  | <b>Beschreibung</b>   |
|------------------------------------|---|
| Überschwingungen<br>(engl. Counts) | Anzahl der einzelnen Überschwingungen über die Triggerschwelle                                |
| Signaldauer                        | Zeitdauer vom ersten Überschreiten bis zum letzten Unterschreiten der Triggerschwelle         |
| Anstiegszeit                       | Zeitdauer vom ersten Überschreiten der Triggerschwelle bis zum Erreichen der Maximalamplitude |
| Maximalamplitude                   | maximaler Betrag der Amplitude eines Zeitsignals  |
| Ereignisrate                       | Anzahl Signale pro Zeit   |
| Impulsfläche                       | Fläche zwischen Zeitachse und SE-Signal   |

*Tabelle 1: Merkmale eines SE-Signals*

Diese Vorgehensweise ist sinnvoll und effizient bei transienten SE-Signalen (Burst-Signale). Liegen kontinuierliche SE-Signale vor, so greifen diese Methoden verständlicherweise nicht.

#### 4.4.2 Signalüberlagerung

Bei ihrem Weg von ihrem Ursprungsort bis zum SE-Sensor werden die SE-Signale durch das Werkstück und die Resonanzeigenschaften des Sensors in ihrem Zeitverhalten verändert. Die ursprünglich diskreten Ereignisse werden durch das Nachschwingen des SE-Sensors derart verlängert, daß von Ereignissen mit einer Dauer von einigen Mikrosekunden SE-Signale von einigen Millisekunden registriert werden. Liegen viele Ereignisse zeitlich eng beieinander, kommt es zur Überlagerung der transienten SE-Signale, so daß der Eindruck einer quasikontinuierlichen Emission von SE-Signalen entsteht. Reflexionen können diesen Effekt begünstigen. Obwohl ursprünglich diskrete SE-Signale vorliegen, können diese nicht mehr gezählt und auch nicht mit Merkmalen wie Überschwingungen, Signaldauer und Ereignisrate beschrieben und klassifiziert werden, da dieses Vorgehen Fehlinterpretationen zur Folge haben kann /52/. Die überlagerten Schallemissionssignale erfordern eine Trennung in separate Signale. Die Trennung von sich überlagernden SE-Signalen stellt eine Hauptproblematik in der Schallemissionsdiagnostik dar /53/. Die Analyse von quasikontinuierlichen SE-Signalen kann durch unterschiedliche Maßnahmen verbessert werden, die im folgenden kurz dargestellt werden.

- ◆ Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von gedämpften Breitbandaufnehmern. Diese Sensoren haben zwar eine deutlich geringere Empfindlichkeit, sie erlauben allerdings eine bessere Trennung von zeitlich dicht aufeinanderfolgenden Signalen /54/.
- ◆ Die Trennung von SE-Signalen mittels Bandfiltern über ihren Frequenzgehalt bei der Diagnose von Reibvorgängen wird z.T. mit Erfolg eingesetzt /55/. Dies setzt allerdings voraus, daß sich SE-Signale mit unterschiedlichem Frequenzgehalt, die beispielsweise durch unterschiedliche Quellen emittiert werden, überlagern.
- ◆ Kontinuierliche und transiente SE-Signale lassen sich oftmals über die Amplitudenverteilung unterscheiden, wenn es sich bei den transienten Signalen um energiereiche Burst-Signale mit gegenüber den kontinuierlichen Signalen erhöhter Amplitude handelt /56/.

- ◆ Während der Überwachung des Werkzeugverschleißes beim Drehen kommt es zu einer kontinuierlichen Schallemission durch plastische Verformungsvorgänge im Werkstück und im Span sowie durch Reibvorgänge. Zusätzlich werden transiente Signale (Burst-Signale) durch Spanbruchprozesse, durch das Aufschlagen der Späne auf das Werkstück bzw. den Werkstückhalter und durch Werkzeugausbrüche erzeugt. Die Trennung der SE-Signale wurde in diesem Fall über einen speziellen Signalprozessor erreicht /57/. Dabei wird das Schallemissionssignal zur Trennung des Spanbruchsignals und des Grundgeräuschsignals mit einem Schwellenwertsignal verglichen. Das Schwellenwertsignal wird aus dem Rauschmittelwert des Grundsignals abgeleitet, indem für die Mittelwertbildung durch Ausblenden nur diejenigen Werte des Schallemissionssignals berücksichtigt werden, die außerhalb der den Spanbruchsignalen zugeordneten Zeitfenstern auftreten /58/.

Darüber hinaus existieren Verfahren, mit denen die Zuverlässigkeit von SE-Messungen bewertet und die tatsächliche Ereigniszahl bei sich überlagernden SE-Signalen rekonstruiert werden kann /59,60/. Diese Verfahren basieren auf der Annahme, daß bei einer großen Anzahl von gemessenen SE-Signalen die Häufigkeit des zeitlichen Signalabstandes einer statistischen Poisson-Verteilung unterliegt. Auf dieser Basis läßt sich so einerseits die Zuverlässigkeit einer Messung von sich überlagernden SE-Signalen bestimmen und andererseits die wirkliche Anzahl von SE-Ereignissen rekonstruieren. Bisherige experimentelle Untersuchungen zeigen, daß eine solche Annahme die tatsächlichen Verhältnisse richtig wiedergibt. Diese Rekonstruktionsmethode kann angewendet werden, wenn sich bis zu 90 % der SE-Signale überlagern. Dieses Verfahren wurde bisher weitgehend an homogenen Werkstoffen mit Erfolg eingesetzt /61,62,63,64/.

#### **4.4.3 Anwendung der SEA**

Die SEA eignet sich hervorragend zur Detektion von Rißbildungs- und Rißwachstumsvorgängen, z.B. infolge einachsiger Zugbelastung, Biegebelastung, Spannungsrißkorrosion, wasserstoffinduzierter Rißbildung und Thermoschockbelastung. Bei allen Rißbildungs- und Rißfortschrittsvorgängen wird beobachtet, daß die

Intensität der SE-Signale nicht nur von der Größe des Rißfortschritts, sondern auch von der spezifischen Belastung an der Rißfront abhängt.

Die Überwachung von Fertigungsprozessen kann mit SEA vorgenommen werden. Beim EB-Schweißen von Uran läßt sich anhand der Schallemissions(SE)-Signale der Durchschweißungsgrad bestimmen. Dabei werden überwiegend kontinuierliche Signale emittiert und es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen dem RMS-Wert und dem Grad der Durchschweißung /65/. Durch das Verhältnis des RMS-Wertes bezogen auf die Signalenergie sind Aussagen über die Mikrorißbildung während des Schweißens möglich /66/. SE-Messungen an Nickel-Basis-Superlegierungen bestätigen die Eignung der SEA zur Überwachung des EB-Schweißprozesses. Dabei entstehen während des Schweißens zwei Typen von SE-Signalen /67/. Die Herstellung glatter Schweißnähte verursacht demnach eine rein kontinuierliche Schallemission. Erst durch Oberflächenfehler in der Schweißnaht entsteht eine dichte Folge von Burst-Signalen. Die Signale hängen vom lokalen Wärmedurchfluß ab und werden durch die Erstarrung hervorgerufen. Ein weiterer Signaltyp ist durch vereinzelte Burst-Signale mit sehr hohen Amplituden gekennzeichnet. Diese SE-Signale werden durch Risse in Wurzelnähe verursacht. Eine Trennung von Erstarrungsgeräuschen und Rißsignalen ist folglich aufgrund der unterschiedlichen Amplitude möglich.

Weitere SE-Messungen an hochfesten, niedriglegierten Stählen während des EB-Schweißens lassen drei vollkommen voneinander unabhängige Schallemissionstypen feststellen. Mit Beginn des Schweißprozesses findet eine Schallemission mit hoher Amplitude infolge von Gasexplosionen bzw. Eruptionen statt. Während und in der Folge des Schweißprozesses erstarrt die Naht und emittiert dabei Schall, der auf Umwandlungsvorgänge im Werkstoff zurückzuführen ist. Nach Beendigung des Schweißprozesses dauern die Erstarrungsgeräusche an. Daneben treten während des Schweißprozesses und im Anschluß daran Rißgeräusche auf. Die Überwachung der Rißbildung kann nach Prozeßende ohne jegliche Störungen vorgenommen werden /68,69/.

Auch beim Löten können durch die Aufnahme der entstehenden SE-Signale Aussagen über den Verlauf des Fertigungsprozesses gemacht werden. Dabei besteht die Möglichkeit der Erkennung von Verformungsvorgängen, Phasenumwandlungen, Riß-

bildung, Rißfortschritt und Bruchvorgängen. Zum Bestimmen der während des Abkühlens nach dem Lötprozeß freiwerdenden Schallemission wird ein SE-Sensor an die Enden der Proben gekoppelt und die freiwerdenden Impulse werden aufsummiert in einer Kurve dargestellt. Aufschluß über die in Abhängigkeit von der Abkühlzeit dargestellten Schallsummenverläufe bringen anschließende Festigkeitsprüfungen mit fraktographischen Untersuchungen der Bruchflächen. Im Vergleich kann zwischen fehlerbehafteten und fehlerfreien Verbindungen im Schallsummenverlauf unterschieden werden /70,71/.

Beim thermischen Spritzen würde sich die Aufnahme der SE-Signale, welche infolge des Partikelauftreffens auf das Bauteil entstehen, anbieten. Bisher sind Forschungsarbeiten durchgeführt worden, die den während des thermischen Spritzens entstehenden Luftschall zur Prozeßüberwachung nutzen /72,73/. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen erkennen, daß deren Korrelation mit dem Partikelzustand während des Fluges nicht immer eindeutig sind.

#### **4.5 Fazit aus dem Stand der Technik**

Der Stand der Technik dokumentiert, daß Bedarf an einem Verfahren zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses besteht. Der Grund dafür ist die schwankende Schichtgüte, die ihre Ursache in der Vielzahl der nicht on-line regelbaren Prozeßgrößen hat.

Bisher bekannte Methoden zur Prozeßdiagnostik sind zeitaufwendig und teuer. Sie sind z.Z. nicht geeignet, den Prozeß zu überwachen. Sie werden zur Erweiterung des wissenschaftlichen Verständnisses der Vorgänge beim Spritzprozeß und zu dessen Optimierung eingesetzt.

Die SEA bietet ein großes Potential zur Überwachung von Fertigungsprozessen. Bei der Überwachung des thermischen Spritzprozesses mittels SEA könnte das Aufprallen der Spritzpartikel auf der Bauteiloberfläche ausgewertet werden. Der dabei entstehende Körperschall würde von allen relevanten Prozeßmerkmalen gekennzeichnet sein. Dazu zählen u.a. die Partikelgeschwindigkeit, die Temperatur, Masse, Viskosität und auch die Eigenschaften der Bauteiloberfläche.

Eine Problematik stellt sich beim Einsatz der SEA beim thermischen Spritzen jedoch dar. Durch die enorme Anzahl von Spritzpartikeln wird es zur Signalüberlagerung kommen und es entstehen kontinuierliche SE-Signale. Bei kontinuierlichen SE-Signalen können konventionelle Auswertalgorithmen (Tabelle 1, S. 17) nicht zum Einsatz kommen.

Der Einsatz der SEA beim thermischen Spritzen kann folglich durch zwei unterschiedliche Vorgehensweisen geschehen. Entweder es gelingt, die meßbare Partikelanzahl derart zu reduzieren, daß transiente SE-Signale vorliegen oder zur Auswertung der entstehenden kontinuierlichen SE-Signale müssen neue Auswertalgorithmen entwickelt werden.

## 5 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist das Bereitstellen eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses auf der Basis der SEA.

Der im zu beschichtenden Bauteil durch das Auftreffen der Spritzpartikel entstehende Ultraschall (Körperschall) soll aufgenommen und analysiert werden. Der entstehende Ultraschall spiegelt die Eigenschaften der Spritzpartikel hinsichtlich ihrer thermischen und kinetischen Energie wieder. Darüber hinaus gehen sämtliche Informationen über den Aufprallvorgang in die Ultraschallenstehung ein. Folglich werden die Ultraschall-Signale exakt von den selben Einflußfaktoren bestimmt wie die Güte der entstehenden Schicht.

Während des thermischen Spritzens entsteht eine enorme Anzahl von Spritzpartikeln. Aufgrund dieser hohen Anzahl von möglichen SE-Quellen ist im zu beschichtenden Bauteil mit der Entstehung von kontinuierlichen SE-Signalen zu rechnen. Es sollen Algorithmen und Strategien entwickelt werden, um die direkt am zu beschichtenden Bauteil vorliegenden SE-Signale zur Prozeßüberwachung zu nutzen. Das Ergebnis dieser Auswertung soll eine bauteilunabhängige Aussage über den Prozeßverlauf liefern.

Grundsätzlich soll die folgende Vorgehensweise gewählt werden: Durch die gezielte Veränderung von on-line einstellbar und regelbaren Prozeßparametern (z.B. Strom, Zerstäubergasdruck) werden definierte Prozeßzustände eingestellt und auf dieser Basis ein auf der SEA basierendes Verfahren entwickelt. Da dieses Prüfverfahren nicht zur Überwachung der on-line regelbaren, sondern gerade der on-line nicht regelbaren Prozeßparameter eingesetzt werden soll, muß abschließend eine Erprobung und Anwendung für diese on-line nicht regelbaren Parameter (z.B. Düsenverschleiß) durchgeführt werden.

Durch die Überwachung des thermischen Spritzprozesses werden die verfahrensbedingten Prozeßschwankungen erfaßbar. Der Prozeßüberwachung kommt eine sehr hohe Bedeutung zu, weil der thermische Spritzprozeß häufig am Ende einer langen Wertschöpfungskette steht, was eine zerstörende Bauteilprüfung sehr unwirtschaftlich macht. Bei Einzelteilen ist die zerstörende Bauteilprüfung vollkommen ausgeschlossen. In diesem Fall ist ein fehlerfreier Beschichtungsprozeß erforderlich.

## 6 Entstehung von Schallemission während des thermischen Spritzens

### 6.1 Signalüberlagerung

Eine wichtige Fragestellung bei der Überwachung des Beschichtungsprozesses mit SEA ist, ab welcher Partikelanzahl mit kontinuierlicher SE zu rechnen ist. Ist  $p$  die Partikelrate (Partikel pro Sekunde) und  $T_D$  die mittlere Signaldauer der entstehenden SE-Signale, so folgt als Kriterium für das Einsetzen kontinuierlicher SE:

$$\text{Gleichung 2} \quad T_D \geq \frac{1}{p}$$

$T_D$  := mittlere Signaldauer [s]  
 $p$  := Partikelrate [ $s^{-1}$ ]

### 6.2 Berechnung der Partikelrate

Die Partikelrate ist abhängig vom Beschichtungsverfahren, dem Spritzwerkstoff und den Prozeßparametern. Im folgenden werden die Partikelraten jeweils für das Lichtbogenspritzen und das APS abgeschätzt.

$$\text{Gleichung 3} \quad p = \frac{\dot{m}}{V \cdot \rho}$$

$p$  := Partikelrate [ $s^{-1}$ ]  
 $\dot{m}$  := Massenfluß [kg/s]  
 $V$  := mittleres Partikelvolumen [ $m^3$ ]  
 $\rho$  := Dichte [ $kg/m^3$ ]

Unter der Annahme einer kugelförmigen Teilchengometrie folgt Gleichung 4.

$$\text{Gleichung 4} \quad p = \frac{\dot{m} \cdot 6}{d^3 \cdot \rho \cdot \pi}$$

$p$  := Partikelrate [ $s^{-1}$ ]  
 $\dot{m}$  := Massenfluß [kg/s]  
 $d$  := mittlerer Teilchendurchmesser [m]  
 $\rho$  := Dichte [ $kg/m^3$ ]

Setzt man in Gleichung 4 für beide Beschichtungsverfahren die üblichen Werte für den Massenfluß, die Dichte und den mittleren Teilchendurchmesser ein, so ergeben sich Partikelraten von mehr als  $10^7$  Partikel pro Sekunde (Tabelle 2).



|                          | <b>APS</b>                            | <b>atmosphärisches<br/>Lichtbogenspritzen</b> |
|--------------------------|---------------------------------------|---|
| <b>d</b>                 | 30 $\mu\text{m}$                      | 28 $\mu\text{m}$                              |
| $\dot{m}$                | 1 g/s                                 | 2 g/s   |
| <b><math>\rho</math></b> | 4000 kg/m <sup>3</sup><br>(Chromoxid) | 7000 kg/m <sup>3</sup><br>(Stahldraht)        |
| <b>p</b>                 | $1,8 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$       | $2,5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$               |

Tabelle 2: Partikelraten beim APS und beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen

Dieser Wert (Partikelrate  $p = 2,5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ ) führt nach Gleichung 2 zu einer mittleren Signaldauer  $T_D$ , ab der kontinuierliche SE-Signale emittiert werden, zu 40 ns. Dies liegt auch bei einer für die SEA relativ hohen Frequenz von 1 MHz noch deutlich unter der Schwingungszeit von 1  $\mu\text{s}$ . Es kommt also mit Sicherheit zu Signalüberlagerung und damit zu quasi-kontinuierlichen SE-Signalen.

### 6.3 Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Meßfläche

Eine Möglichkeit zur Verringerung der meßbaren SE-Signale und damit auch zur Vermeidung quasikontinuierlicher SE-Signale ist die Verkleinerung der Meßfläche. Dies bedeutet, SE-Signale beim thermischen Spritzen werden nicht direkt am Bauteil, sondern mittels einer speziell zu entwickelnden Sensorik aufgenommen. Diese Sensorik kann z.B. aus SE-Sensor und einem Wellenleiter bestehen. Sie muß derart aufgebaut werden, daß nicht sämtliche Partikel, sondern nur ein geringer Anteil auf die Meßfläche trifft. Im folgenden soll abgeschätzt werden, auf welches Maß die Meßfläche zu verkleinern ist, um die Aufnahme quasi-kontinuierlicher SE-Signale zu vermeiden.

Die Partikel sind im Spritzstrahl nicht gleichverteilt, sondern bezogen auf den Abstand zur Strahlachse normalverteilt [74]. Die Normalverteilung ist vollständig festgelegt durch die Standardabweichung  $\sigma$  und den Erwartungswert  $a$  (Gleichung 5). Der Erwartungswert  $a$  bestimmt die Lage der Verteilung und die Standardabweichung  $\sigma$  den Abstand der Wendepunkte der Gaußschen Glockenkurve vom Erwartungswert. Experimentelle Untersuchungen aus der Literatur ergeben, daß beim thermischen Spritzen für die Standardabweichung abhängig von den On-line-Prozeßparametern und der Düse Werte zwischen 8 mm und 12 mm angenommen werden können [74].

Die Betrachtung der normalverteilten Partikeldichte im Spritzstrahl ist zur Abschätzung der Meßfläche wichtig wichtig.

Gleichung 5 
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \frac{(x-a)^2}{\sigma^2}}$$

$a$  := Erwartungswert  
 $\sigma$  := Standardabweichung  
 $x$  := Variable der Verteilung

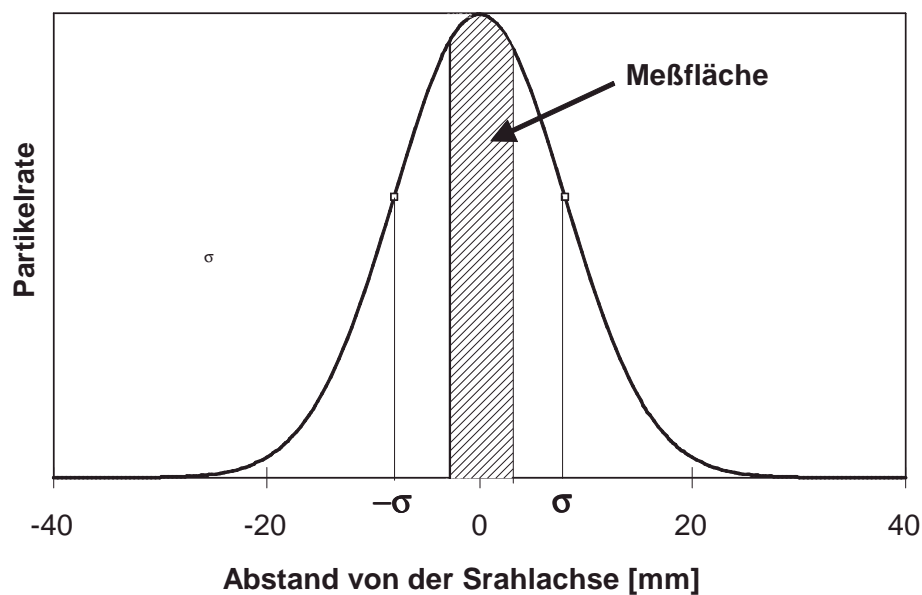


Abbildung 6: Schematische Partikelverteilung im Spritzstrahl,  $\sigma = 8$  mm

Abbildung 6 verdeutlicht, daß abhängig von der Positionierung der Meßfläche im Strahl unterschiedliche Partikelraten gemessen werden. Die Positionierung beeinflusst folglich die Registrierung von kontinuierlichen SE-Signalen. Um zu ermitteln, bis auf welchen Durchmesser die Meßfläche reduziert werden muß, wird als Sensorposition das Zentrum des Spritzstrahls angenommen, da dort die größte Partikeldichte vorliegt.

Untersuchungen beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen dokumentieren, daß der Öffnungswinkel des Spritzstrahl ca.  $16^\circ$  beträgt. Daraus ergibt sich bei einem in der Praxis üblichen Spritzabstand von 150 mm ein Durchmesser für den Spritzspot von ca. 40 mm. Bei der abstandsabhängigen Ermittlung des Spotdurchmessers wird bei feststehender Spritzpistole eine Probe beschichtet. Die äußere Begrenzung des

Spots wird als der Wert definiert, wenn die lokale (normalverteilte) Schichtdicke unter 20 % des Maximalwertes im Spotzentrum sinkt /75,76/. Durch Näherung an Gleichung 5 ergibt sich daraus eine Standardabweichung für die Partikelverteilung beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen von 12 mm. Die Partikelverteilung im Spot und die resultierende Schichtdickenverteilung können durch eine zweidimensionale, symmetrische Normalverteilung beschrieben werden (Gleichung 6).

Gleichung 6 
$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

$\sigma$  := Standardabweichung  
 $x$  := Abstand von der Spritzstrahlachse

Aus Gleichung 6 ergibt sich dann die Partikelverteilung im Spritzstrahl in Abhängigkeit vom Abstand von der Spritzstrahlachse, z.B: in einem Spritzspotdurchmesser von 40 mm befinden sich 80 % der Spritzpartikel. Aus der so erhaltenen Partikelverteilung im Spritzstrahl läßt sich die Partikelrate auf einer im Zentrum des Spritzstrahls positionierten Meßfläche bestimmen. Die Anzahl der auf der Meßfläche auftreffenden Partikel und damit auch die mittlere Zeitdauer zwischen dem Auftreffen zwischen 2 Partikeln ist abhängig vom Durchmesser der Meßfläche. Es ergibt sich ein in Abbildung 7 dargestellter Zusammenhang.

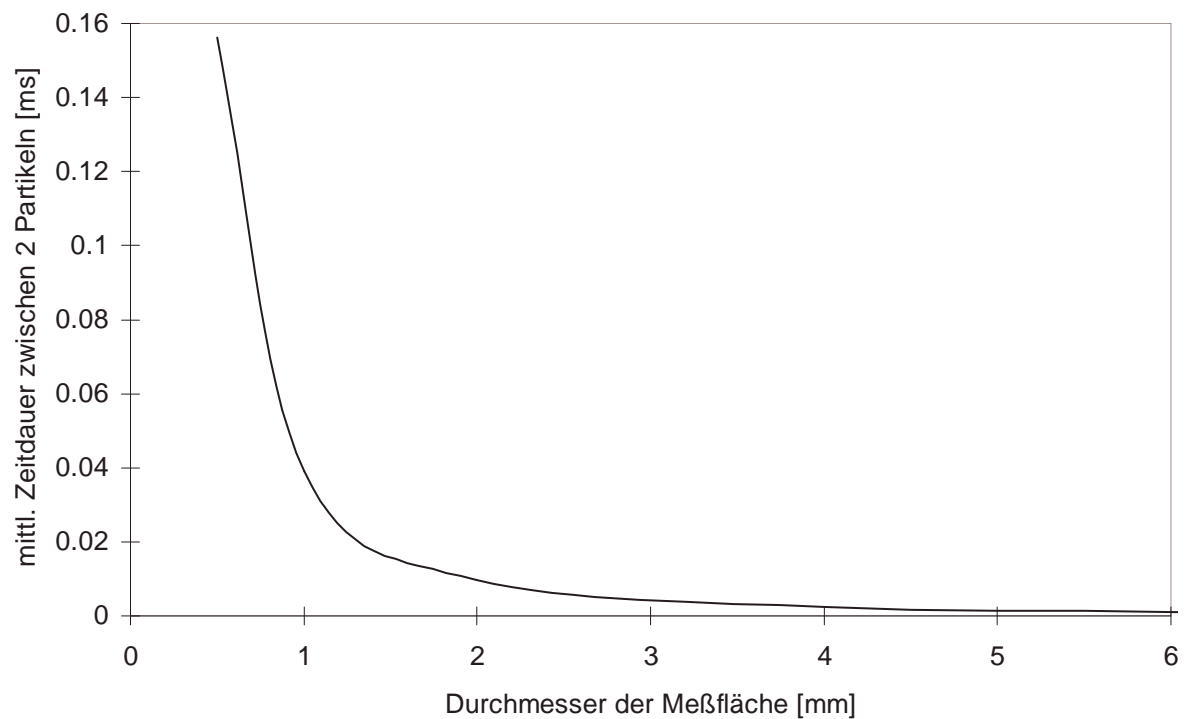


Abbildung 7: Mittlere Zeitdauer zwischen 2 Partikeln in Abhängigkeit vom Durchmesser der Meßfläche,  $\sigma = 12$ , Partikelrate  $p = 2,5 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$

Durch die Verringerung der Meßfläche auf einen Durchmesser unter 1 mm ist es möglich, eine mittlere Zeitdauer von ca. 100  $\mu\text{s}$  zwischen dem Auftreffen von zwei aufeinander folgenden Partikeln zu erreichen (Abbildung 7).

## 7 Meßtechnik zur Aufnahme von SE-Signalen

Für die Untersuchungen standen zwei verschiedene Meßsysteme zur Verfügung. Zum einen ein kommerzielles SE-Meßsystem, welches in der Lage ist, aus dem Zeitsignal charakteristische Merkmale zu bestimmen; zum anderen ein Meßsystem, welches erlaubt, kontinuierlich ohne jeglichen Datenverlust Zeitsignale auf einen Festspeicher zu schreiben. Beide Systeme werden im folgenden kurz vorgestellt.

### 7.1 On-Line Erfassung der Charakteristika des Zeitsignals

Bei diesem Meßgerät handelt es sich um das Meßsystem SPARTAN AT der Fa. PAC. Dieses Gerät ermittelt während einer SE-Messung die Charakteristika der Zeitsignale. Zu diesen Charakteristika zählen die Überschwingungen über eine gesetzte Schwelle (Counts), die Signaldauer, die Anstiegszeit bis zum Erreichen des Signalmaximums und die Impulsfläche (vergl. auch Tabelle 1, S. 17). Die Funktionsweise dieses Gerätes ist wie folgt:

Vor Beginn der Messung werden eine Triggerschwelle [mV] sowie eine Zeitschwelle [ $\mu$ s] eingestellt. Übersteigt die Amplitude des SE-Signals die Triggerschwelle, so ist der Signalbeginn mit diesem Vorgang festgelegt. Das Signalende wird als der Zeitpunkt ermittelt, zu dem die Amplitude unter die Triggerschwelle abfällt und anschließend mindestens für den Wert der gesetzten Zeitschwelle unter der Triggerschwelle bleibt. Ist dies der Fall, so wird das Gerät zur Messung des nächsten Ereignisses wieder bereit gemacht. Bei diesem Meßsystem läßt sich eine minimale Zeitschwelle von 30  $\mu$ s einstellen; kurzfristig können mit diesem Gerät bis zu 1000 SE-Signale pro Sekunde registriert werden. Das Meßsystem speichert die Charakteristika der SE-Signale auf Festspeicher; die Zeitsignale werden nicht abgespeichert, folglich können Frequenzanalysen nicht vorgenommen werden.

Der SPARTAN AT liefert in Echtzeit die Charakteristika des Zeitsignals. Das Meßsystem ist insbesondere geeignet zur Aufnahme transienter SE-Signale. Bei kontinuierlicher SE können u.U. einzelne Signale nicht aufgelöst werden. Besteht die Gefahr der Signalüberlagerung, so empfiehlt sich mit diesem Meßsystem die Auswertung von kumulierten Parametern, z.B. Summe der einzelnen Impulsflächen in Abhängigkeit von der Zeit.

## 7.2 Kontinuierliche Abspeicherung von Zeitsignalen

Zur kontinuierlichen Abspeicherung von SE-Signalen steht ein spezielles Meßsystem der Fa. Hewlett Packard zur Verfügung. Dieses System besteht aus 4 Analog/Digital(A/D)-Wandlern. Die A/D-Wandler tasten das Zeitsignal jeweils mit einer Abtastfrequenz bis 5,12 MHz ab, die Auflösung beträgt 16 Bit. Die Zeitsignale können ohne jeglichen Datenverlust auf Festspeicher bei einer Summenabtastrate von 5,12 MHz geschrieben werden. Bei der maximalen Summenabtastrate werden 10,24 Megabyte pro Sekunde auf den Festspeicher geschrieben. Die Meßzeit wird nur durch die Größe des Festspeichers begrenzt; dieser hat eine Größe von 8,4 GB, damit kann einkanalig eine maximale Meßzeit von 820 s realisiert werden.

Das HP-Meßsystem bietet mehrere Vorteile. Die Messung der SE-Signale ist schwellenunabhängig, aus den vorliegenden Zeitsignalen können weit mehr Informationen ermittelt werden als die bekannten Charakteristika (vergl. Tabelle 1, S. 17). Als weitere Informationen gehen somit die Signalform und das Frequenzspektrum in die Auswertung ein. Hieraus lassen sich zahlreiche weitere Parameter bestimmen. Das Meßsystem kann durch eine speziell auf Meß- und Auswerteaufgaben zugeschnittene Programmiersprache (HP Veetest) programmiert werden. Sämtliche Auswerteargorithmen, die in dieser Arbeit Verwendung finden, sind eigenhändig programmiert worden. Die Quellcodes zu den wichtigsten Programmen befinden sich Kapitel 12 (Quellcodes).

## 7.3 Auswahl der SE-Sensoren

Üblicherweise werden zur Aufnahme von SE-Signalen hochempfindliche Sensoren eingesetzt. Diese eignen sich zum Nachweis sowie zur Analyse von Vorgängen im Mikrobereich, angefangen von Mikrorissen, Reißreibung bis hin zu Versetzungsbewegungen. Die Anwendung beim thermischen Spritzen hat hinsichtlich der Empfindlichkeit nicht so hohe Anforderungen, da die Signalamplitude durch den Aufprallvorgang der Partikel hoch ist. Um die Signalüberlagerung möglichst gering zu halten, ist eine kurze Abklingzeit wünschenswert. Deshalb sollen die Sensoren kein ausgeprägtes Resonanzverhalten haben. Außerdem wird damit eine Auswertung des Frequenzspektrums ermöglicht. Eine weitere notwendige Eigenschaft der Sensoren ist die elektromagnetische Verträglichkeit mit dem

Beschichtungsprozeß. Beim thermischen Spritzen können hochfrequente Vorgänge, wie z.B. das Zünden des Lichtbogens, die hochempfindliche Meßkette stören. Daraus lassen sich zwei Kriterien für die Auswahl eines geeigneten Sensors festlegen:

1. Das Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis von SE-Signalen, die beim Auftreffen von Partikeln auf die Bauteiloberfläche entstehen (Nutzsignal), soll groß sein im Vergleich zu dem solcher Partikel sein, die durch das Vorbeifliegen der Partikel am Bauteil induziert werden (Störsignal). Das Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis ist optimal mit Hilfe der Einhüllenden zu bestimmen.
2. Das gemessene Frequenzspektrum soll den Frequenzgehalt der entstehenden Ultraschallsignale und nicht das Eigenschwingverhalten des Sensors abbilden. Es ist deshalb wichtig, daß Bauteileigenfrequenzen (ca. 60 kHz, siehe Gleichung 10, S 66) erkannt werden können.

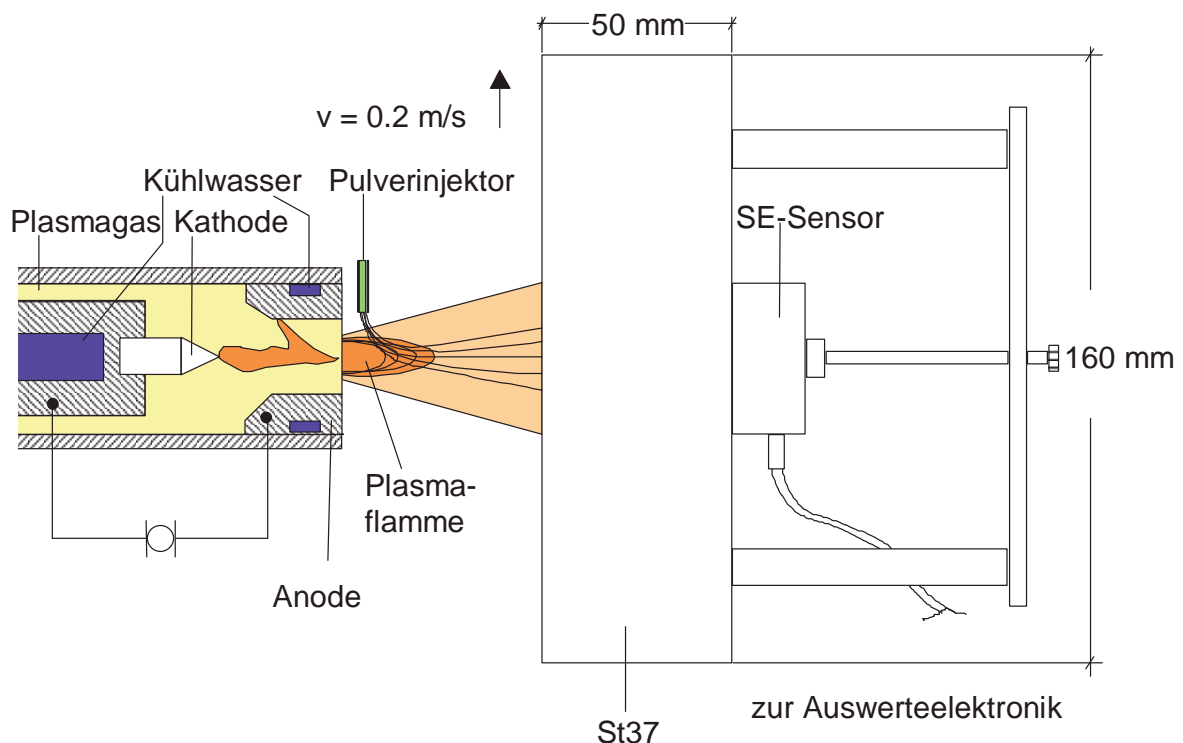


Abbildung 8: Aufnahme von SE-Signalen während des atmosphärischen Plasmaspritzens (APS) auf einem Stahlblock  $160 \times 160 \times 50 \text{ mm}^3$ , Beschichtungswerkstoff: Chromoxid

Um geeignete Sensoren zu bestimmen, waren Vorversuche erforderlich. Die Vorversuche bestehen in der Aufnahme von SE-Signalen während des thermischen Sprit-

zens. Einhüllende und Frequenzspektrum sind damit Kalibrierkurven der Sensoren für das thermische Spritzen. Dies beiden Kurven sind aussagekräftiger als die Herstellerangaben (inklusive deren Kalibrierkurven), da die Sensoren von Herstellerseite her nicht für das thermische Spritzen ausgelegt worden sind.

Für die Vorversuche wurde das Meßsystem eingesetzt, welches in Kapitel 7.2. ausführlich beschrieben ist. Die Zeitsignale wurden während der Versuche vorverstärkt und mit einer Frequenz von 5,12 MHz abgetastet. Zur Aufnahme der SE-Signale wurde ein Probekörper (St 37) mit den Abmessungen 160x160x50 mm<sup>3</sup> verwendet, auf dessen Rückseite der SE-Sensor mittels Ultraschallkoppelpaste angekoppelt war (Abbildung 8).

Der Stahlblock wurde während der experimentellen Untersuchung mit Chromoxid durch atmosphärisches Plasmaspritzen (APS) beschichtet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Verfahren des thermischen Spritzens, das APS und das atmosphärische Lichtbogenspritzen, eingesetzt. Hinsichtlich des Partikelaufralls sind die Anforderungen an die SE-Sensorik identisch. Beim APS sind jedoch stärkere elektromagnetische Störungen durch das hochfrequente Zünden des Lichtbogens zu erwarten. Aus diesem Grund wird zur Sensorauswahl das APS verwendet. Ein SE-Sensor, der eine Messung beim APS erlaubt, ist auch für das atmosphärische Lichtbogenspritzen geeignet.

Während der Versuche überfuhr die Manipulatoreinheit mit der Spritzpistole den Probekörper in horizontaler Richtung mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 ms<sup>-1</sup>. Bei den Untersuchungen wurden 4 Sensoren getestet (Tabelle 3).

| Sensor            | Beschreibung                              |
|-------------------|---|
| Panametrics V605  | Ultraschallprüfkopf, Mittenfrequenz 1 MHz |
| Minhorst 2 MHz    | breitbandiger SE-Sensor, 0,2 – 2 MHz      |
| Sonatest RP25HS-1 | breitbandiger Rollsensor                  |
| Dunegan 373       | resonanter SE-Sensor, 100 – 500 kHz       |

Tabelle 3: Sensoren zur Aufnahme von SE-Signalen beim thermischen Spritzen



Die Meßzeit betrug 10 s, dabei wurde der Stahlblock 3-4 mal überfahren. Während der Beschichtungsversuche blieben die Beschichtungsparameter konstant. Zur Auswertung wurden von den aufgenommenen Zeitsignalen die Einhüllende (gemittelt über 8192 Punkte) sowie ein FFT(Fast Fourier Transformation)-3D-Plot analysiert. Die Daten im FFT-3D-Plot sind aus Darstellungsgründen sowohl in der Frequenz- als auch der Zeitachse gemittelt (z.B. Abbildung 11).

### 7.3.1 Elektromagnetische Störsignale

Die Auswertung der Frequenzspektren zeigt, daß das Meßsystem Zeitsignale im Bereich von ca. 0 –400 kHz auch dann registriert, wenn keine Partikel auf die Bauteiloberfläche treffen; d.h., wenn die Manipulatoreinheit derart positioniert ist, daß die Partikel am Bauteil vorbeifliegen. Da sich die Frequenzspektren der Störsignale von den 4 getesteten Sensoren sehr ähnlich sind, wird hier beispielhaft das Spektrum der Störsignale gemessen mit dem Sensor Dunnegan 373 dargestellt (Abbildung 9).

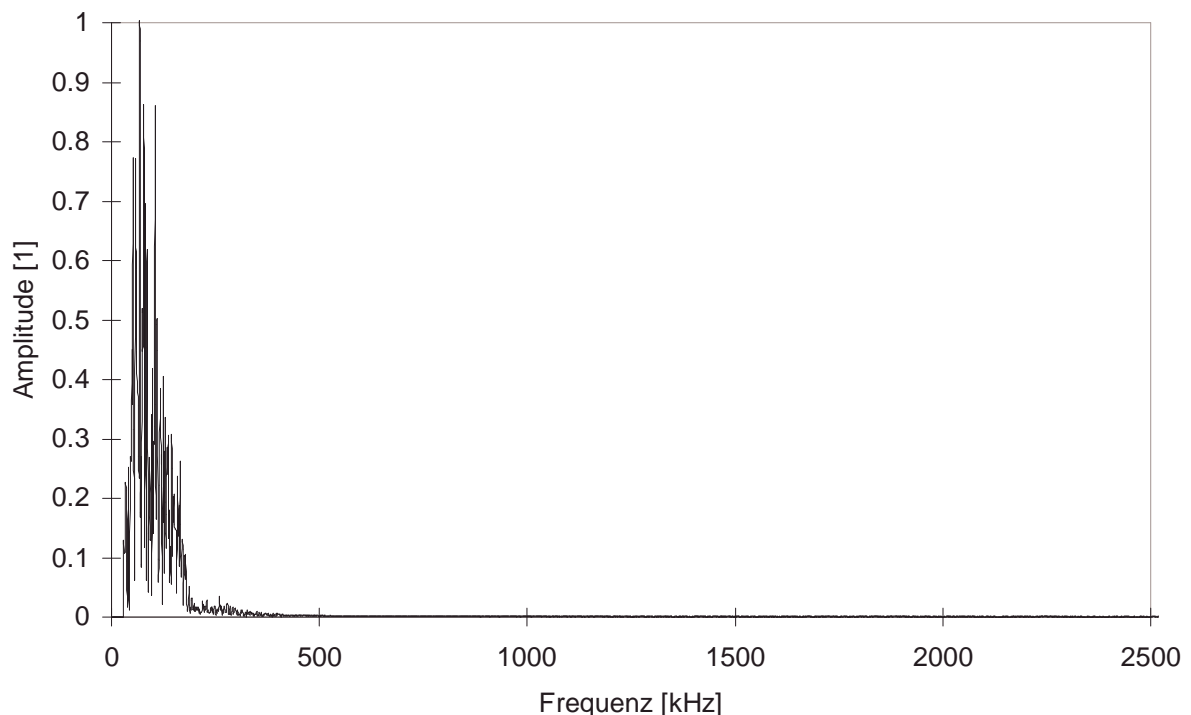


Abbildung 9: *Frequenzspektrum der elektromagnetischen Störsignale (Sensor Dunnegan 373)*

Abbildung 9 ist beispielhaft für den Frequenzbereich der elektromagnetischen Störungen. Da dieser Verlauf sensorunabhängig ist, ist davon auszugehen, daß die Stö-

nung nicht am Sensor, sondern an einer anderen Stelle der Meßkette in das System einfließt. Dabei kann es sich z.B. um Meßkabel, Kabelverbindungen oder den Vorverstärker handeln. Abschirmmaßnahmen wie eine zusätzliche Erdung des Meßsystems waren nicht erfolgreich. Darüber hinaus sind diese Signale unabhängig von den Prozeßparametern. Die Konsequenz aus diesen Ergebnissen ist, daß in den folgenden experimentellen Arbeiten der Frequenzbereich unter 400 kHz aus den Zeitsignalen herausgefiltert wird.

### 7.3.2 Dunnegan 373

Der Sensor Dunnegan 373 verfügt über ein Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis von ca. 3. Jedoch können einzelne Störsignale die Nutzsignale übertreffen (Abbildung 10).

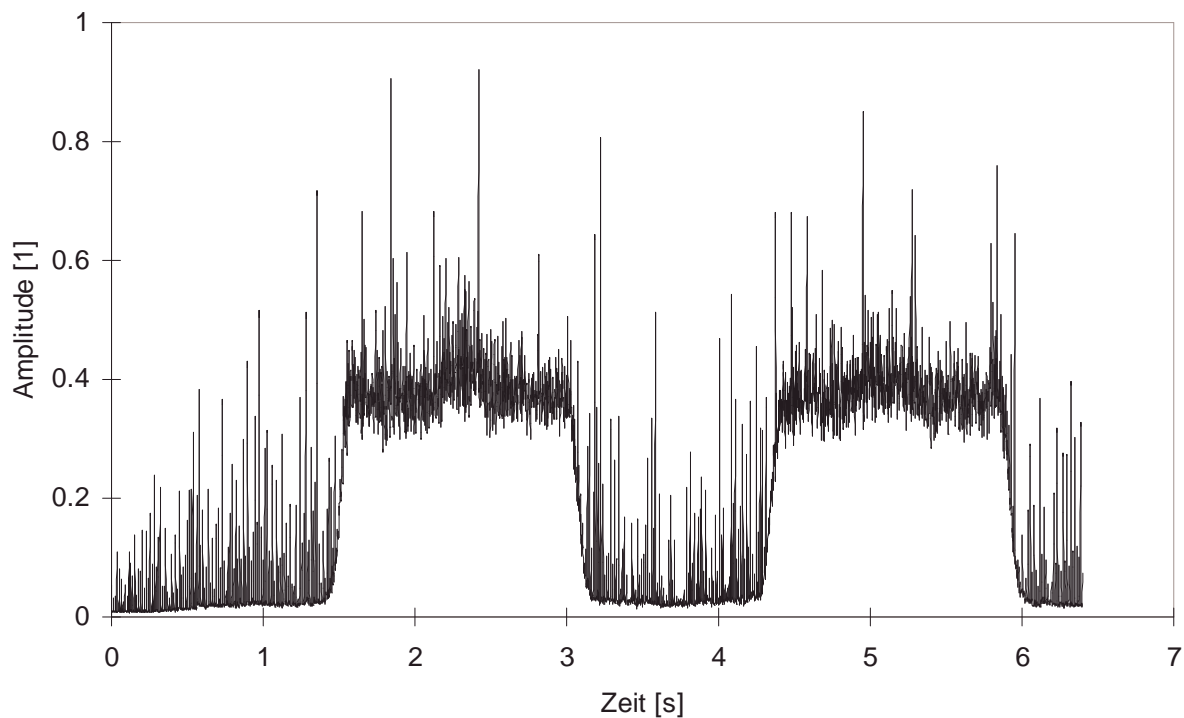


Abbildung 10: *Einhüllende (gemittelt über 8192 Punkte=1,6 ms) über das Zeitsignal während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Dunnegan 373, 400 – 2500 kHz*

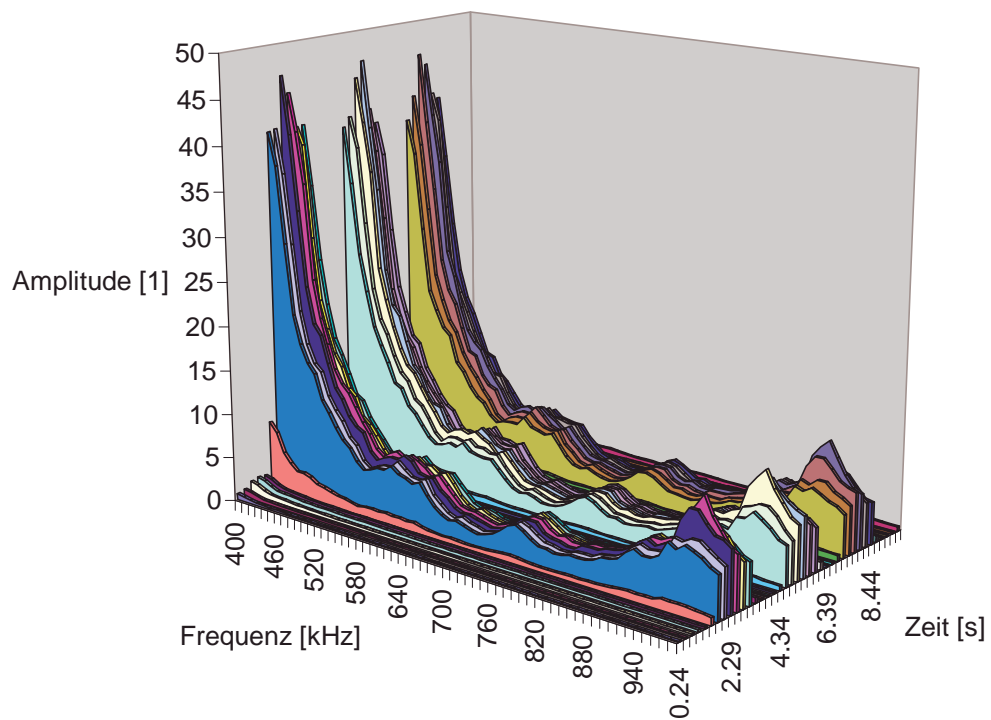


Abbildung 11: Frequenzspektrum während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Dunnegan 373

Die Darstellung des Frequenzspektrums in Abhängigkeit von der Zeit läßt das Partikelauftreffen eindeutig durch die vergrößerte Amplitude erkennen. Die Form des Spektrums ist jedoch nicht von den Bauteileigenfrequenzen gekennzeichnet (Abbildung 11).

### 7.3.3 Minhorst 2 MHz

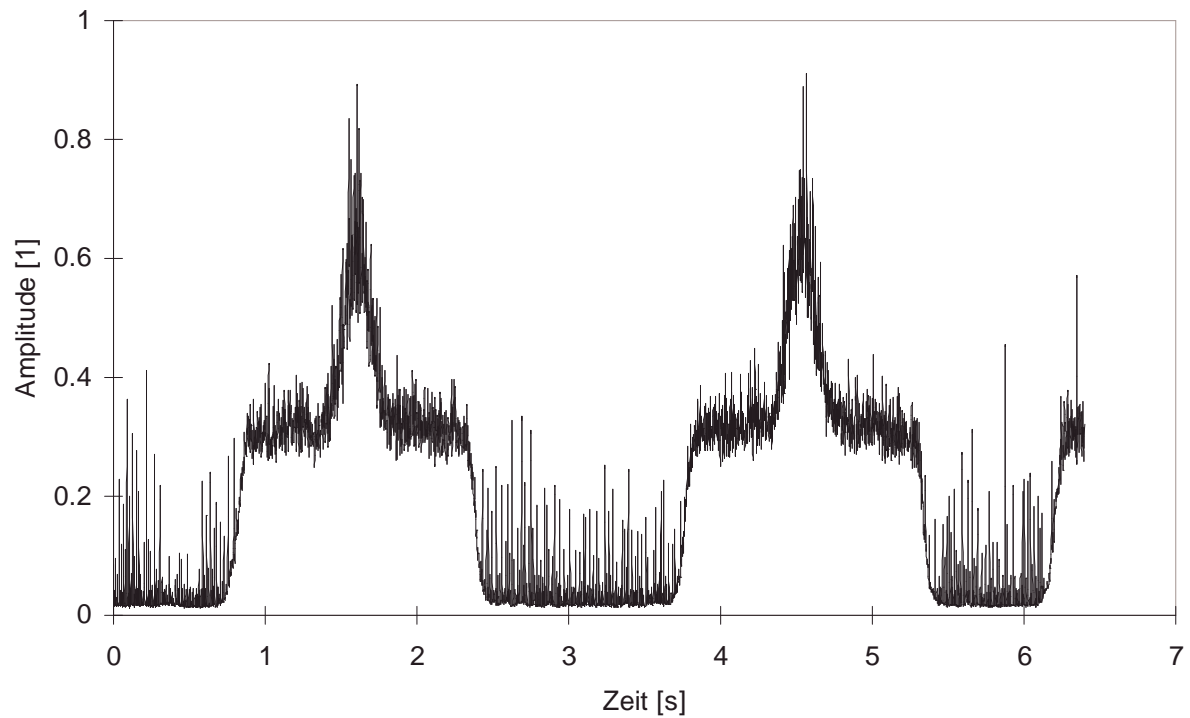


Abbildung 12: *Einhüllende (gemittelt über 8192 Punkte=1,6 ms) über das Zeitsignal während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Minhorst 2 MHz, 400 – 2500 kHz*

Der Sensor Minhorst 2 MHz hat ein Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis von ca. 4 (Abbildung 12). Das Spektrum (Abbildung 13) ist gekennzeichnet durch die äquidistanten Maxima der Bauteileigenfrequenzen.

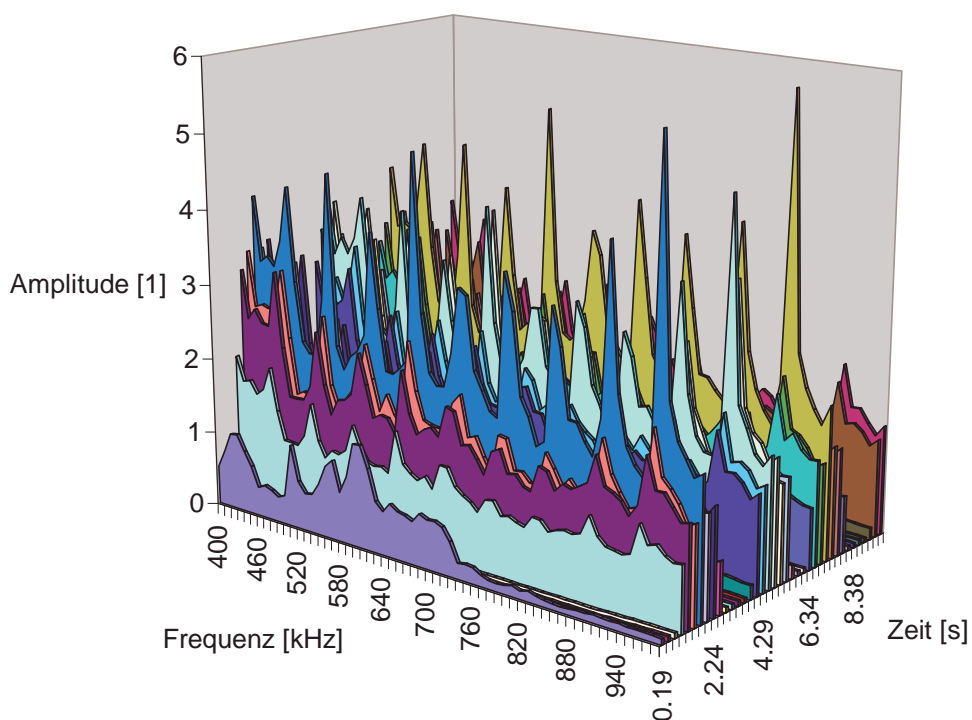


Abbildung 13: Frequenzspektrum während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Minhorst 2 MHz

### 7.3.4 Panametrics 1 MHz

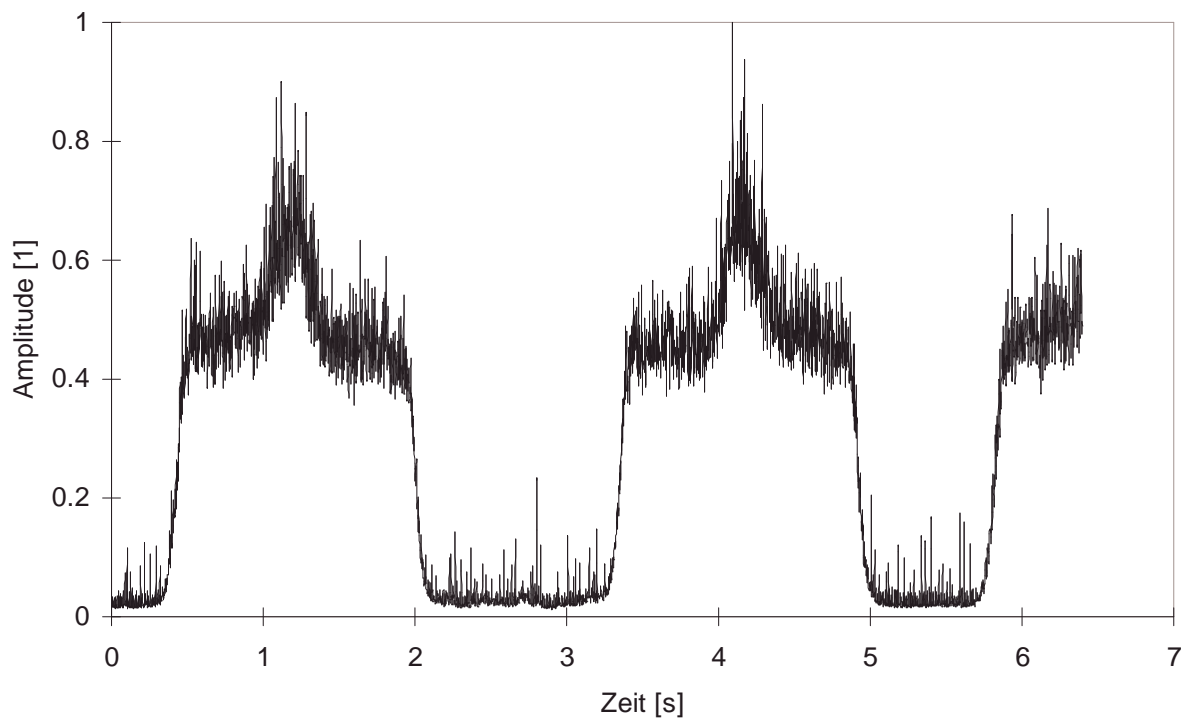


Abbildung 14: Einhüllende (gemittelt über 8192 Punkte=1,6 ms) über das Zeitsignal während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Panametrics 1 MHz, 400 – 2500 kHz

Das Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis des Sensors Panametrics 1 MHz beträgt ca. 8, im Spektrum lassen sich Bauteiligenfrequenzen deutlich erkennen.

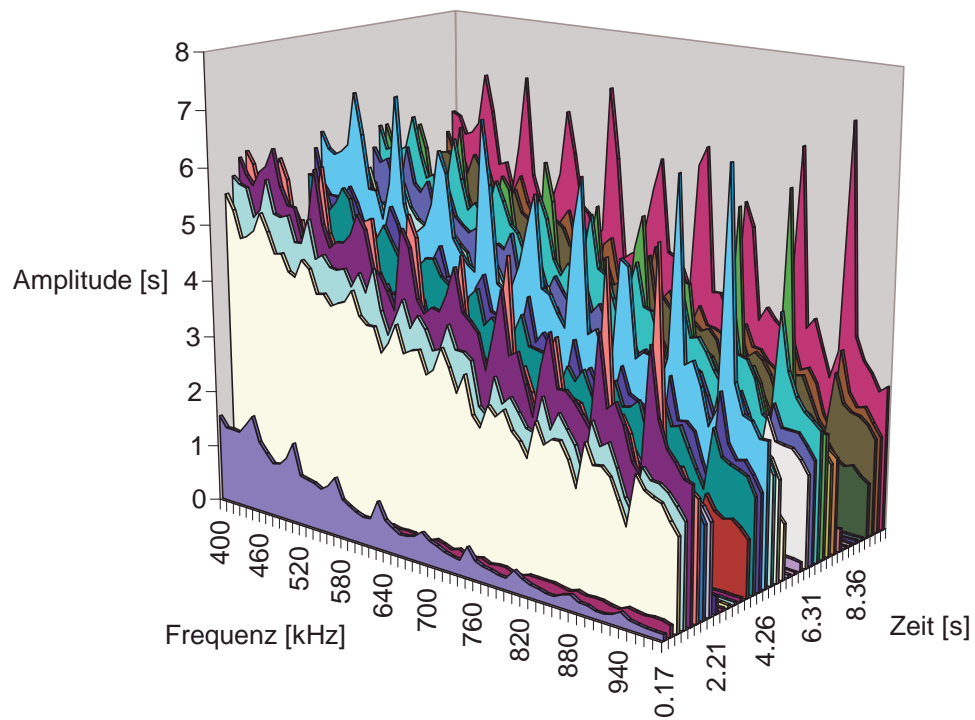


Abbildung 15: *Frequenzspektrum während des APS-Beschichtungsvorganges, Sensor Panametrics 1 MHz*

## 7.3.5 Sonatest RP25HS-1 Rollsensor

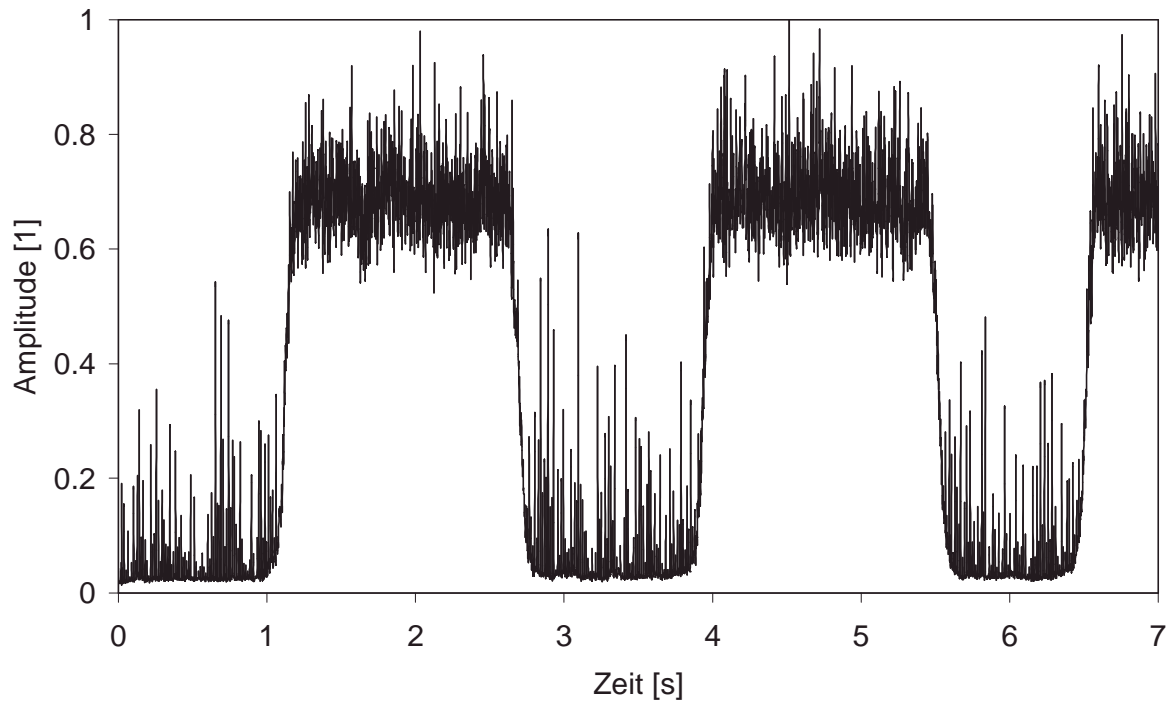


Abbildung 16: Einhüllende (gemittelt über 8192 Punkte=1,6 ms) über das Zeitsignal während des APS-Beschichtungsvorganges, Sonatest RP25HS-1 Rollsensor, 400 – 2500 kHz

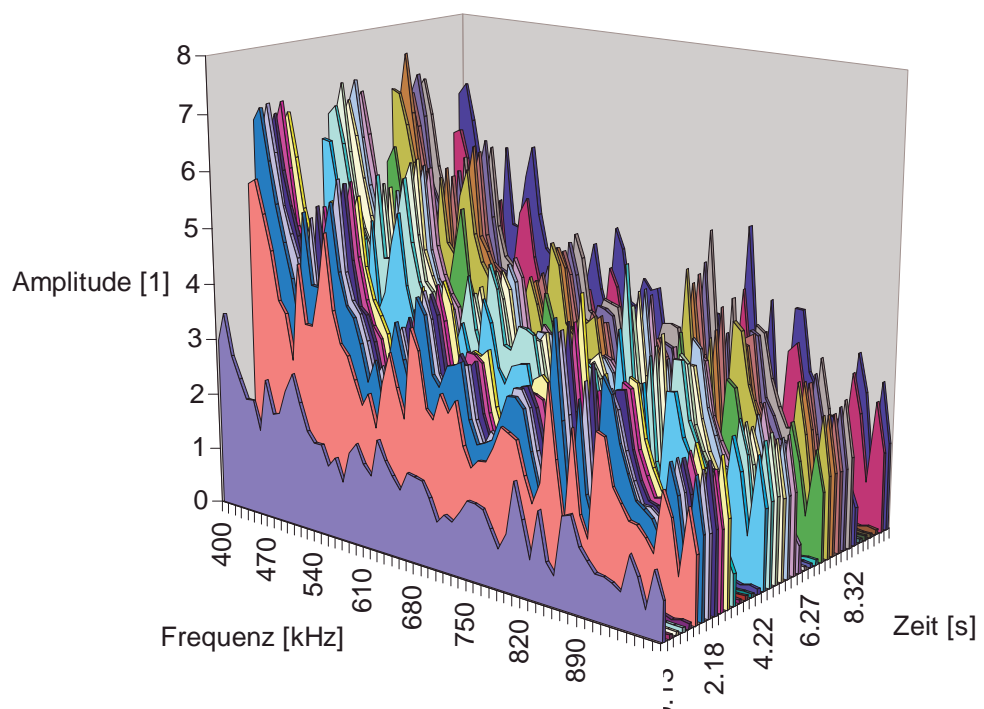


Abbildung 17: Frequenzspektrum während des APS-Beschichtungsvorganges, Sonatest RP25HS-1 Rollsensor

Das Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis des Sonatest-Rollsensors beträgt ca. 4, im Spektrum lassen sich Bauteilfrequenzen deutlich erkennen. Der Sensor ist breitbandig, er weist jedoch ein gewisses Resonanzverhalten auf.

### 7.3.6 Ergebnis der Sensorauswahl

| Sensor            | Erkennung der Bauteil-eigenfrequenzen | Nutzsignal / Störsignal-Verhältnis |
|-------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Panametrics V605  | Ja                                    | 8                                  |
| Minhorst 2 MHz    | Ja                                    | 4                                  |
| Sonatest RP25HS-1 | Ja                                    | 4                                  |
| Dunegan 373       | Nein                                  | 3                                  |

*Tabelle 4: Sensorauswahl*

Für die Beschichtungsversuche wurde der Sensor Panametrics 1 MHz für Untersuchungen mit unveränderter Sensorposition ausgewählt. Dieser Sensor verfügt über das beste Signal-Rausch-Verhältnis und erscheint auch hinsichtlich seines Frequenzverhaltens am geeignetsten. Für Untersuchungen, die einen mobilen SE-Sensor erfordern, kann der Sonatest-Rollsensoren eingesetzt werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis dieses Sensors ist gut, darüber hinaus ist auch das Frequenzverhalten annehmbar.



## 8 Grundlegende Voruntersuchungen

### 8.1 Versuchsaufbau und –durchführung beim Lichtbogenspritzen

Die SE-Signale der auftreffenden Spritzpartikel wurden mittels einer speziellen Soreinrichtung aufgenommen (Abbildung 18). Bei den Versuchen wurde eine atmosphärische Lichtbogenspritzanlage der Firma OSU vom Typ OSU-LG-350 mit LD/U2-Pistole und einem geschlossenen Düsensystem eingesetzt. Das Spritzgut (St 52) wurde senkrecht auf den Grundwerkstoff aufgebracht. Die Düse der Lichtbogenspritzanlage bewegte sich während der Messungen mit einer Axialgeschwindigkeit von  $0,2 \text{ ms}^{-1}$  senkrecht zur Spritzrichtung.

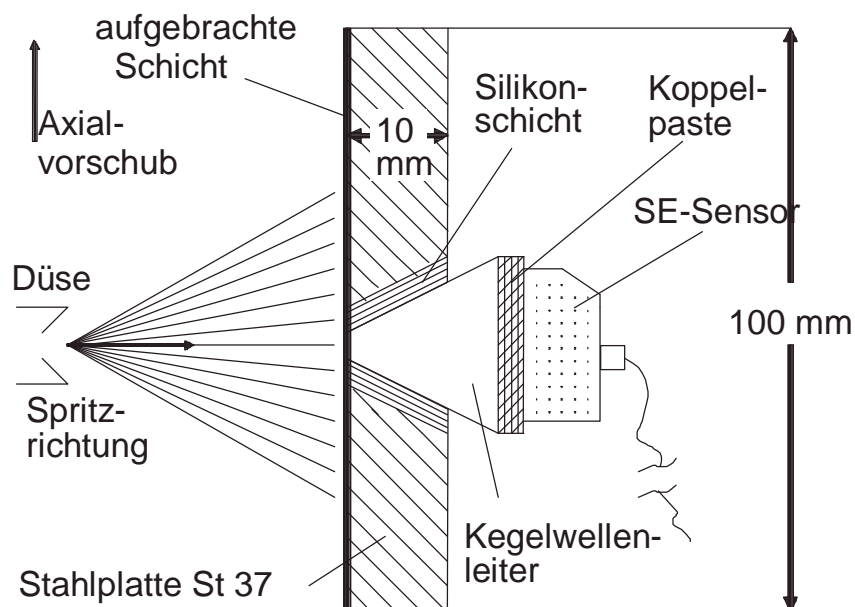


Abbildung 18: Versuchsanordnung zur Aufnahme der SE-Signale mittels Kegelwellenleiter

Zur Schallaufnahme wurde ein Kegelwellenleiter verwendet. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Verwendung von Prüfköpfen mit handelsüblichen Abmessungen bei einer äußerst geringen Meßfläche. Die Spitze des Kegelwellenleiters dient als Meßfläche ( $2 \text{ mm}^2$ ). Zur akustischen Entkopplung ist der Kegelwellenleiter mittels Silikonpaste in eine Stahlplatte eingebracht. Das Überfahren der Meßfläche mit der Spritzpistole bewirkt, daß die auftreffenden Partikel Körperschall erzeugen, welcher vom SE-Sensor (Panametrics 1 MHz, vergl. Kapitel 7.3.6) in elektrische Signale gewandelt wird.

Der Durchmesser der kreisförmigen Meßfläche beträgt 1,6 mm, nach Abbildung 7 ist bei diesem Wert eine mittlere Zeitdauer zwischen zwei Partikeln von ca. 100  $\mu\text{s}$  zu erwarten. Folglich ist das eingesetzte SE-Meßsystem (SPARTAN AT vergl. Kapitel 7.1) mit einer eingestellten Zeitschwelle von 30  $\mu\text{s}$  geeignet, um eine Signaltrennung vorzunehmen. Abbildung 19 zeigt ein Burst-Signal hervorgerufen durch den Aufprall eines Partikels auf den Kegelwellenleiter, die Signaldauer beträgt ca. 80  $\mu\text{s}$ .

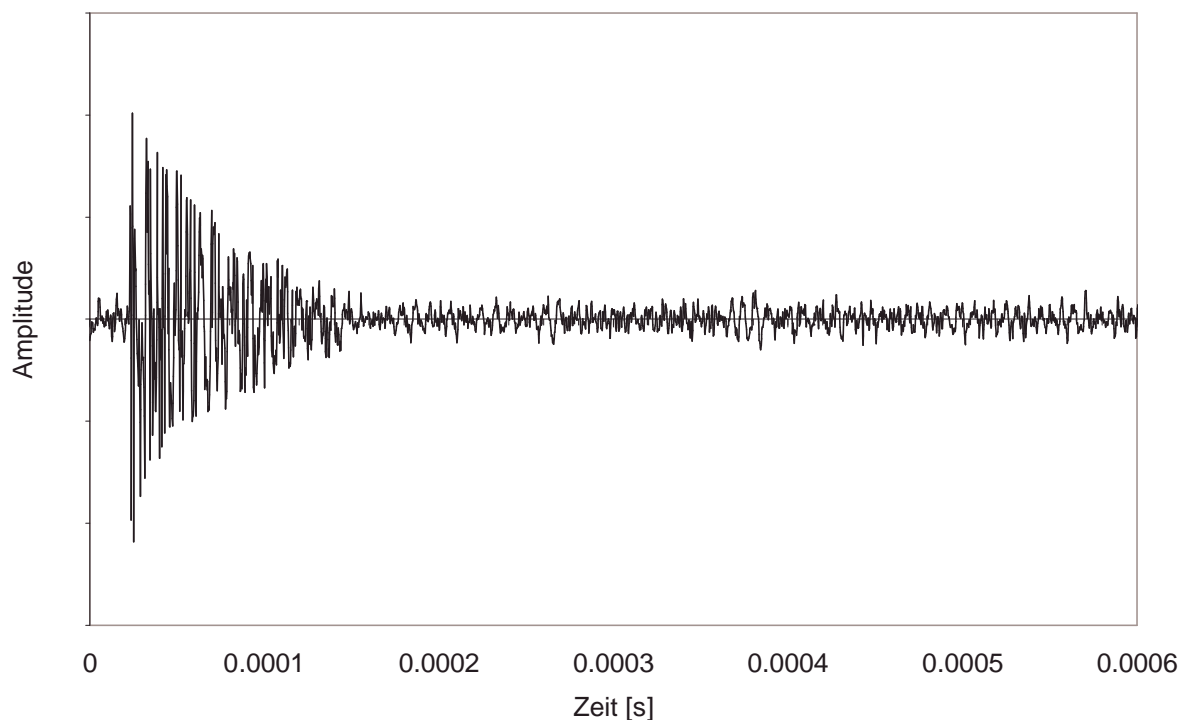


Abbildung 19: *SE-Signal durch Spritzpartikel beim Aufprall auf den Kegelwellenleiter, atmosphärisches Lichtbogenspritzen*

## 8.2 Einfluß von On-line-Prozeßparametern auf die Entstehung der SE-Signale

Um die Partikeleigenschaften definiert zu verändern, wurde der Zerstäubergasdruck zwischen 2,5 bar und 5,5 bar variiert, die anderen On-line-Prozeßparameter wurden konstant gehalten. Die Stromstärke  $I$  betrug 180 A, die Spannung  $U$  28 V und der Spritzabstand  $s$  150 mm.

Dies hat einen Einfluß auf die Partikeleigenschaften, wie der Vergleich mit Meßergebnissen aus der Literatur belegt (Abbildung 20 und Abbildung 21).

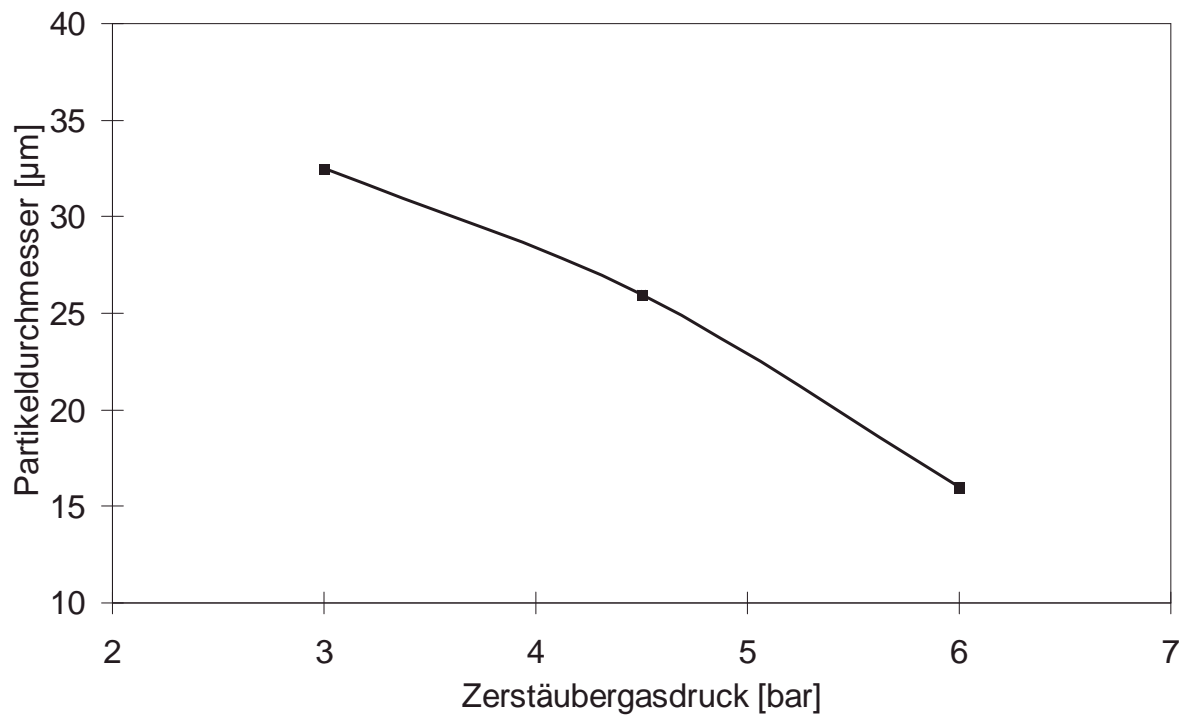


Abbildung 20: *Einfluß des Zerstäubergasdruckes auf den mittleren Teilchendurchmesser /77,78/*

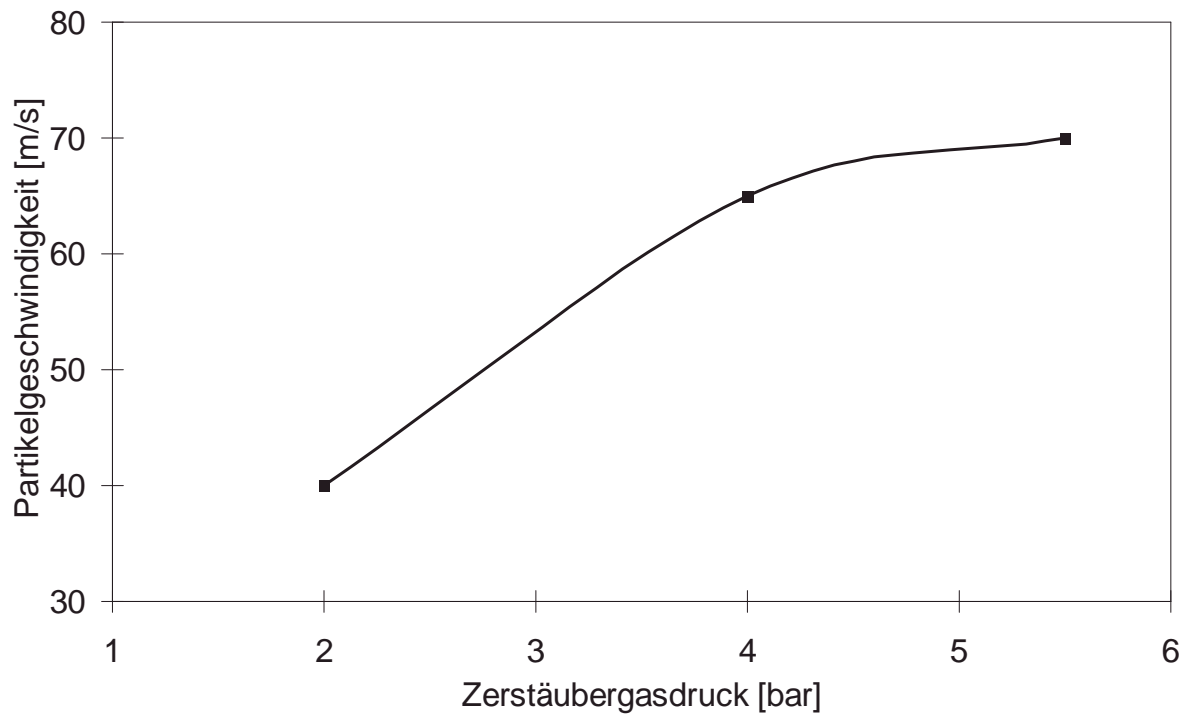


Abbildung 21: *Einfluß des Zerstäubergasdruckes auf die mittlere Partikelgeschwindigkeit /77,78/*

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist der Einfluß des Zerstäubergasdrucks auf die Partikelgröße und die Partikelgeschwindigkeit dargestellt. Wird der Zerstäubergasdruck bei gleichbleibender Spritzgutmenge erhöht, so werden die Teilchen feiner zerstäubt und stärker beschleunigt. Folglich kann eine Abnahme des mittleren Teilchendurchmessers und eine Zunahme der mittleren Teilchengeschwindigkeit beobachtet werden.

Die Auswertung der Schallemissionsmessungen zeigt, daß die Amplitude der SE-Signale durch die Partikeleigenschaften beeinflusst wird. Die auftreffenden Spritzpartikel erzeugen Burst-Signale, deren Maximalamplitude im folgenden als Amplitude bezeichnet wird. Über die Amplitude der einzelnen Schallereignisse ist ein Rückschluß auf Eigenschaften der Partikel möglich. Bei der Auswertung der SE-Messungen wurden die Impulsflächen der SE-Signale einer Überfahrt kumulativ aufgetragen und die zeitliche Änderung betrachtet. Dieser Verlauf entspricht einer integralen Betrachtung des gesamten Spritzprozesses, vorrangig hinsichtlich der Partikelanzahl. Die Impulsflächen der einzelnen SE-Signale ändern sich nicht signifikant.

Mit der Erhöhung des Zerstäubergasdrucks sinkt die Amplitude kontinuierlich von 76 dB bei 2,5 bar bis auf 69 dB bei 5,5 bar ab. Gleichzeitig erhöht sich die kumulierte Impulsfläche aller SE-Signale (Abbildung 23).

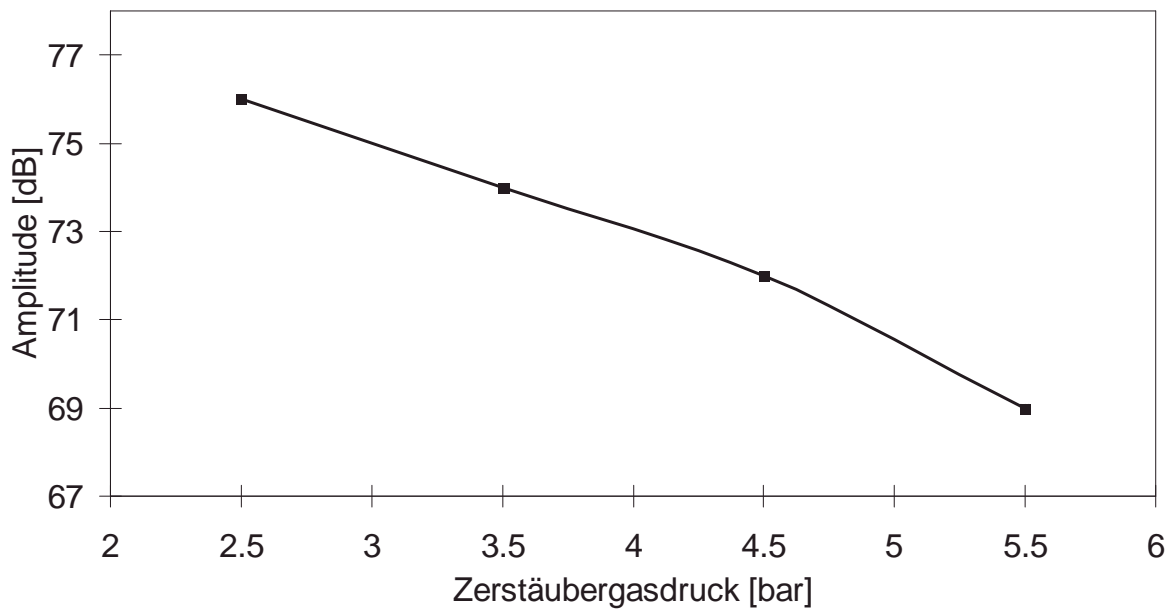


Abbildung 22: Amplitude in Abhängigkeit vom Zerstäubergasdruck,  $I = 180 \text{ A}$ ,  $U = 28 \text{ v}$ ,  $s = 150 \text{ mm}$

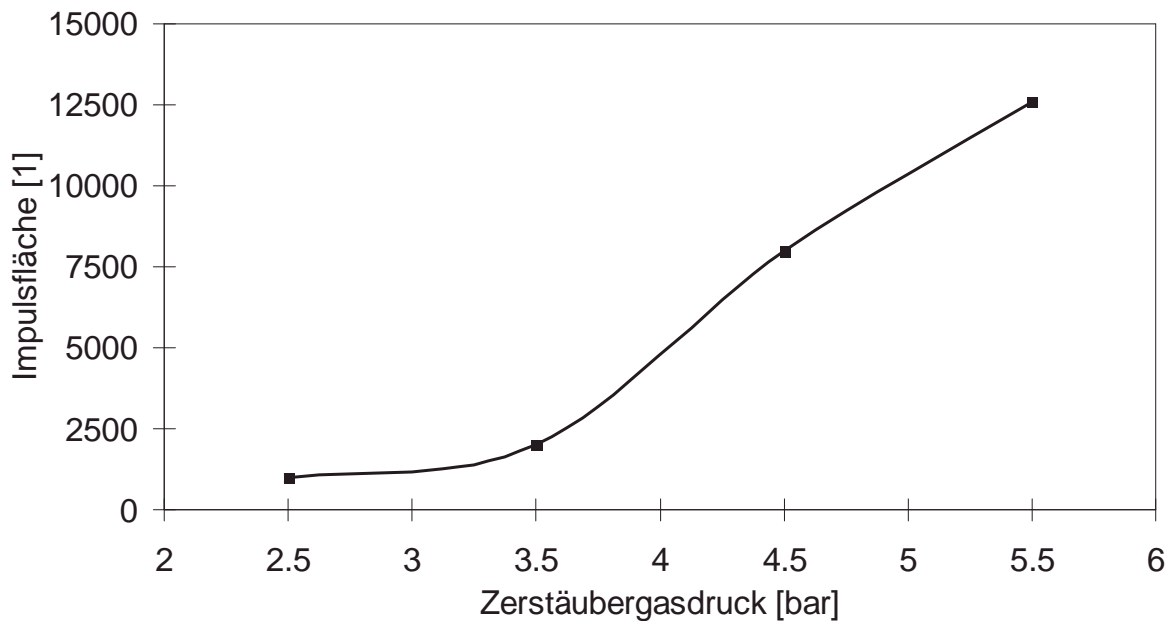


Abbildung 23: kumulierte Impulsflächen bei verschiedenen Zerstäubergasdrücken,  $I = 180 \text{ A}$ ,  $U = 28 \text{ v}$ ,  $s = 150 \text{ mm}$

Die Erhöhung des Zerstäubergasdrucks  $p$  von 2,5 bar auf 5,5 führt also zu folgenden Effekten:

- ◆ Halbierung des mittleren Teilchendurchmessers
- ◆ Erhöhung der mittleren Teilchengeschwindigkeit nahezu um den Faktor 2

Diese Veränderungen der Partikeleigenschaften bewirken die nachgewiesenen Veränderungen der SE-Signale:

- ◆ Abnahme der Amplitude
- ◆ Erhöhung des kumulierten Impulsflächenverlaufs

Zur Abnahme der Amplitude der einzelnen SE-Signale kommt es, da die Partikel beim Auftreffen deutlicher weniger Masse haben. Das Volumen und damit auch die Masse hängt mit der 3. Potenz vom Partikeldurchmesser ab. Die Erhöhung der Teilchengeschwindigkeit schwächt diesen Effekt allerdings ab.

Der kumulierte Impulsflächenverlauf betrachtet nicht das einzelne Teilchen, sondern die Gesamtheit der Partikel. Durch die Energieerhöhung im System (Druckerhöhung) kommt es zu einem deutlichen Anstieg der kumulierten Impulsflächen.

Die Veränderungen der SE-Signale sind also durch die physikalischen Eigenschaften der Partikel erklärbar.

### **8.3 Nachweis typischer Prozeßfehler auf Basis der SE-Signale beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen**

In Kapitel 8.2 wurde der Zerstäubergasdruck als regelbarer Prozeßparameter variiert, um die Entstehung der SE-Signale in Abhängigkeit von definiert veränderten Partikeleigenschaften zu untersuchen. Zur Betrachtung nicht on-line regelbarer Prozeßgrößen wurde im folgenden der Einfluß von Düsenverschleiß und fehlerhafter Montage der Spritzpistole betrachtet. Abbildung 24 dokumentiert die Auswirkung dieser Fehler auf die Schichtstruktur, zum Vergleich wird auch die mikroskopische Aufnahme einer „guten“ Schicht dargestellt.

Ein häufiges Problem beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen ist der Verschleiß der eingesetzten Stromkontaktdüsen. Dadurch kommt es zu einer ungleichmäßigen Stromübertragung und somit zum ständigen Erlöschen und Zünden des Lichtbogens. Ferner gewährleisten durch Abrasion verschlissene Düsen keinen festen Fokuspunkt der Drähte. Dadurch fluchten die Drahtenden nicht und der Lichtbogen stabilisiert sich nicht.

Aus diesem Grund wurden verschlissene Düsen bei den Untersuchungen eingesetzt. Abbildung 24 (Mitte) gibt beispielhaft eine inhomogene Spritzschichtstruktur wider, welche sich beim Beschichten mit einer verschlissenen Düse ergibt. Die Schicht ist für den technischen Einsatz ungeeignet. Deutlich sind dickere Spritzlamellen mit einer hohen Porosität und z.T. frühzeitig erstarrte Spritzpartikel zu erkennen. Dieser Effekt hängt von dem Verschleißzustand der Düse ab.

Durch die fehlerhafte Montage der Spritzanlage kann es trotz korrekt eingestellter Prozeßparameter zu einem ungünstigen Prozeßverlauf und somit zu Schichten minderer Qualität kommen. Um einen solchen Fehler zu simulieren und um zu überprüfen, ob dies durch die akustische Überwachung erfaßt wird, wurde die Spritzpistole absichtlich falsch montiert. Dabei wurde der erforderliche Keramikring im Zerstäubergassystem nicht eingebaut. Dadurch kommt es zu einer Veränderung der Strömungsbedingungen und das Spritzgut wird weniger fein zerstäubt sowie geringer beschleunigt. Im weiteren Verlauf führt die geringere Zerstäubung zu einer schlechten Aufschmelzung der Spritzpartikel (Abbildung 24, unten). Es entstehen sehr breite Lamellen mit hoher Porosität und z.T. frühzeitig erstarrte bzw. nicht vollständig aufgeschmolzene Partikel.

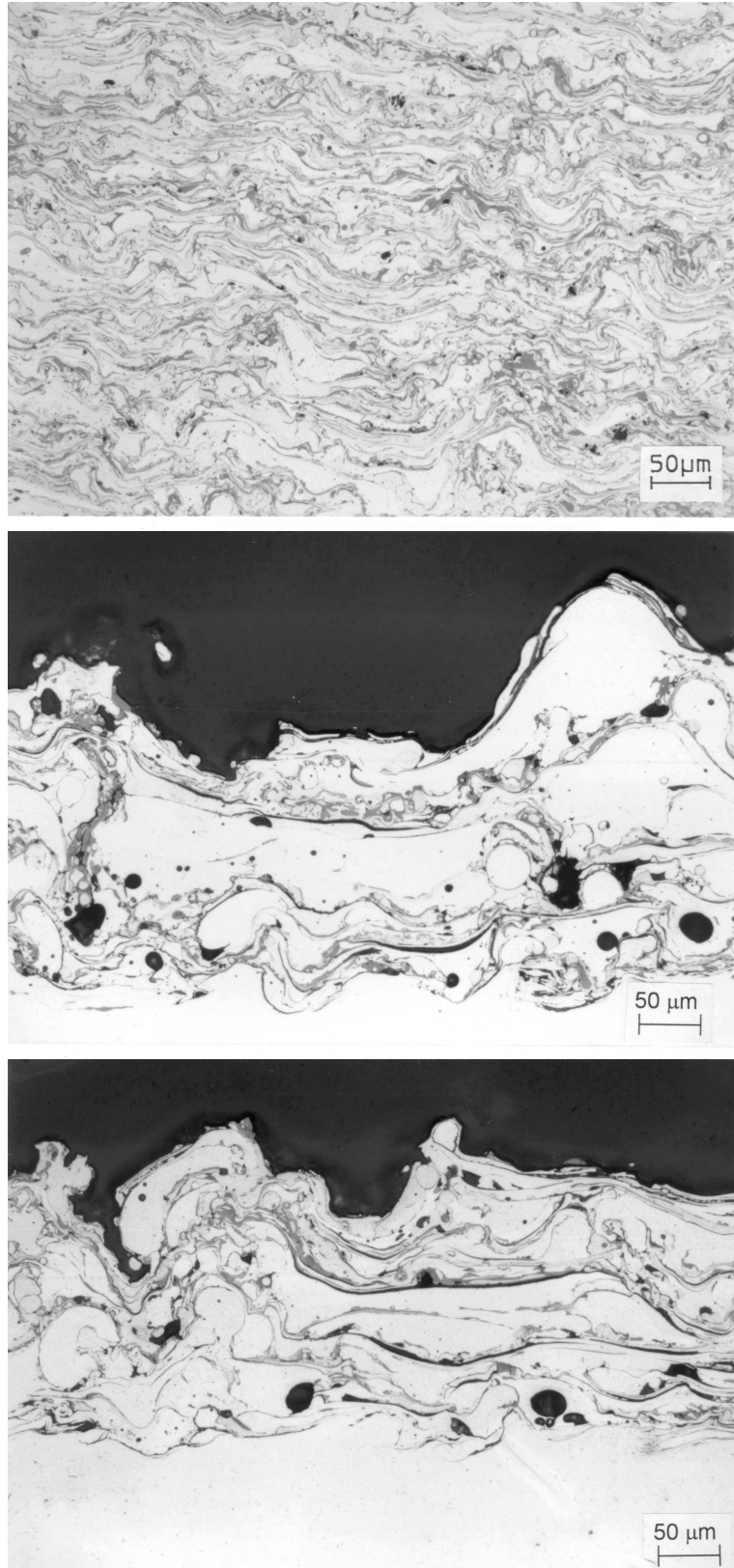


Abbildung 24: Mikroskopische Aufnahme der Schichtstruktur, 200:1  
optimaler Prozeßverlauf (oben)  
mit verschlissener Stromkontaktdüse (Mitte)  
mit fehlendem Keramikring (unten)  
 $p = 4,5 \text{ bar}$ ,  $U = 25 \text{ V}$ ,  $I = 200 \text{ A}$ ,  $s = 150 \text{ mm}$



Abbildung 25 zeigt die Auswirkungen dieser nicht on-line regelbaren Prozeßgrößen auf den zeitlichen Verlauf der SE-Signale. Dargestellt ist die Änderung der Impulsflächenrate in Abhängigkeit von der Überfahrzeit. Beim optimalen Beschichtungsprozeß sind die erreichten Werte deutlich höher als bei den fehlerhaften Prozessen.

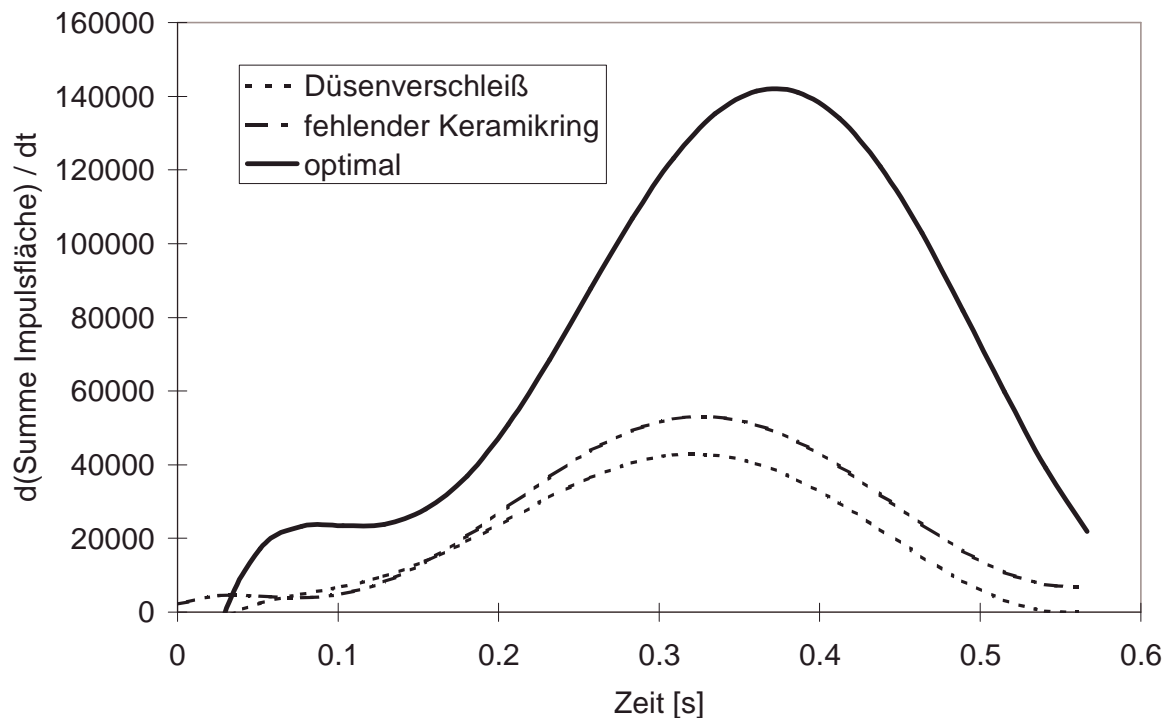


Abbildung 25: *Impulsflächenänderung über der Überfahrzeit,  $p = 4,5 \text{ bar}$ ,  $I = 200 \text{ A}$ ,  $U = 25 \text{ V}$ ,  $s = 150 \text{ mm}$*

Die bisher durchgeführten Untersuchungen mit dem Kegelwellenleiter belegen einen Zusammenhang zwischen den Partikeleigenschaften und den SE-Signalen. Dies gilt für die Variation sowohl der regelbaren als auch der nicht on-line regelbaren Prozeßgrößen. In einem weiteren Schritt sollte nun geklärt werden, ob es möglich ist, auch am Bauteil ohne die Verwendung eines Wellenleiters SE-Signale aufzunehmen und Korrelationen mit den Prozeßeigenschaften zu erkennen (siehe Kapitel 9, S. 50).

## 9 Erweiterung der Methodik zur SE-Messung direkt am Bauteil

Nachdem Kapitel 8 dokumentiert, daß die Partikeleigenschaften die über einen Kegelwellenleiter registrierten SE-Signale beeinflussen, sollte im folgenden untersucht werden, inwieweit es möglich ist, solche Aussagen auch bei der SE-Messung direkt am zu beschichtenden Bauteil vorzunehmen.

Die SE-Messung direkt am zu beschichtenden Bauteil ist aus folgenden Gründen erstrebenswert:

- ◆ Es wird die Schichtentstehung selbst akustisch überwacht. Eigenschaften des Bauteils wie Oberflächenbeschaffenheit und Temperatur beeinflussen die Schichtentstehung. Solche Effekte lassen sich nur am Bauteil nachweisen.
- ◆ Es handelt sich um eine echte on-line Überwachung – und nicht um das diskontinuierliche Anfahren eines Kontroll- bzw. Referenzpunktes.

Zunächst wurden beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen Vorversuche durchgeführt. Als Grundmaterial wurde ein Stahlblock (St 37) mit den Abmessungen 50x160x160 mm<sup>3</sup> verwendet, welcher schon bei den Vorversuchen zur Sensorauswahl eingesetzt wurde (Abbildung 8, S. 31). Vor dem Beschichten wurde die Oberfläche mit Korund gestrahlt, um eine optimale Schichthftung zu garantieren. Zur SE-Aufnahme wurde auf der Rückseite des Stahlblocks der SE-Sensor angekoppelt. Während der Versuche überfuhr die Spritzpistole den Probekörper mit einer Geschwindigkeit von 0,2 m/s.

In Abbildung 26 ist das Zeitsignal infolge des Partikelaufralls dargestellt. Erwartungsgemäß kommt es zu einem kontinuierlichen Signalverlauf. Eine direkte Zuordnung von einzelnen Partikeln zu einzelnen SE-Signalen ist nicht möglich.

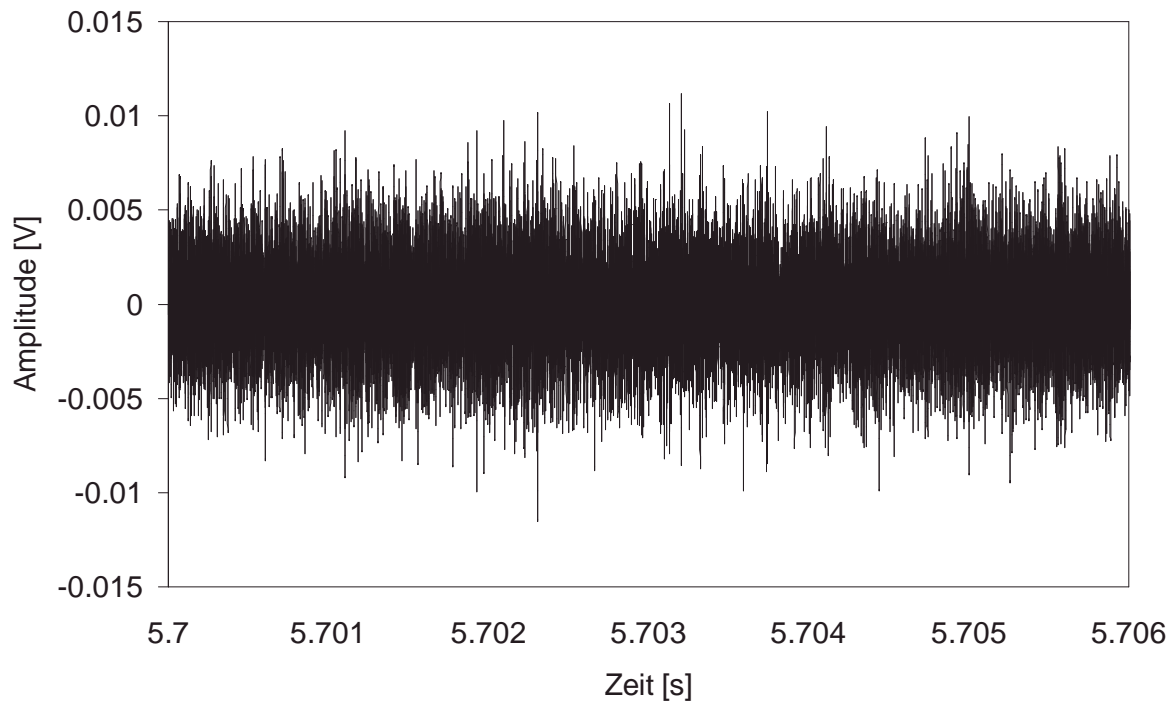


Abbildung 26: Zeitsignal infolge des Partikelaufralls, Bandpaß 0,4-2,5 MHz, atmosphärisches Lichtbogenspritzen, Bauteil: Stahlblock: 50x160x160 mm<sup>3</sup>

Das Ziel aller folgenden Überlegungen muß es also sein, Zusammenhänge zwischen den Partikeleigenschaften und kontinuierlichen SE-Signalen zu erkennen. Zu diesem Zweck ist die Anzahl der den Beschichtungsprozeß beeinflussenden Parameter möglichst gering zu halten. Unter diesem Gesichtspunkt ist das atmosphärische Lichtbogenspritzen ungünstig, da die Partikelgrößen sehr stark streuen.

In Abbildung 27 ist die Partikelgrößenverteilung beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen mit Stahl dargestellt. Die Partikelgrößen schwanken in einem Bereich zwischen 10 µm und 80 µm. Abbildung 28 bestätigt diese Ergebnisse. In der mikroskopischen Aufnahme ist die ganze Breite der entstehenden Partikelgrößen zu erkennen. Aus diesem Grund ist für die SE-Messung am Bauteil ein thermisches Spritzverfahren auszuwählen, welches im Bereich der Partikelgröße nicht so stark streut.

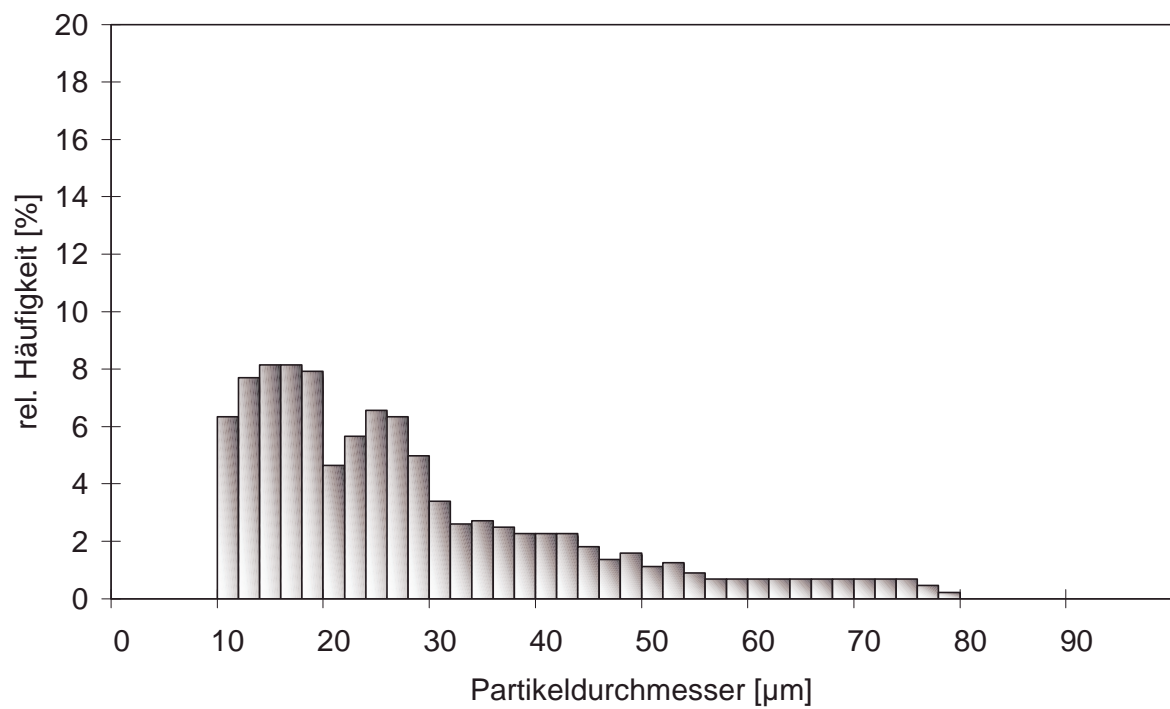


Abbildung 27: Partikelgrößenverteilung beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen, St 37

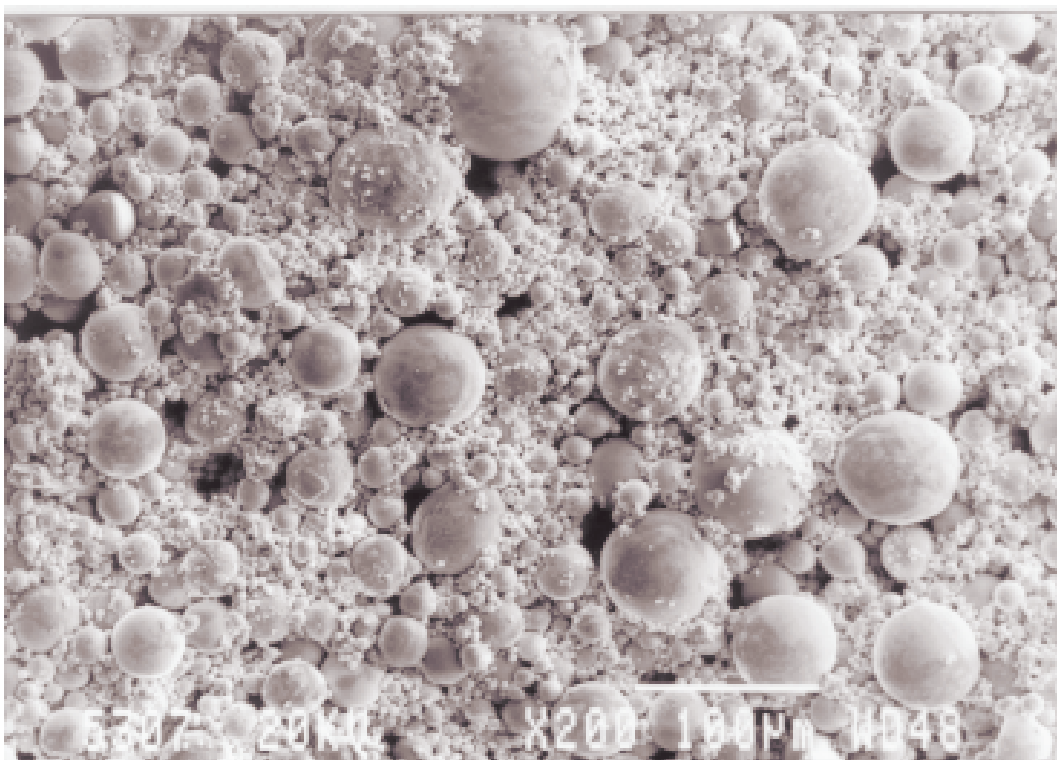


Abbildung 28: Mikroskopische Aufnahme der Partikel beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen

Beim APS wird der Beschichtungswerkstoff in Pulverform zugeführt. Die Partikelgrößen werden insbesondere durch die Größenverteilung im Spritzpulver bestimmt. Damit besteht die Möglichkeit, durch die Auswahl des Spritzpulvers die Partikelgrößenverteilung maßgeblich zu beeinflussen. Abbildung 29 und Abbildung 30 belegen die geringe Streubreite der Größenverteilung im Spritzpulver.

Für die SE-Messungen am Bauteil wurde folglich das APS ausgewählt. Während der Voruntersuchungen wurde beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen als einstellbare Prozeßgröße der Zerstäubergasdruck verändert. Eine vergleichbare Prozeßgröße beim APS ist die Stromstärke. Die Stromstärke beim APS beeinflusst, ähnlich wie der Zerstäubergasdruck beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen, die kinetische und thermische Energie der Spritzpartikel. Die Erhöhung der Stromstärke beim APS führt zur einer besseren Partikelauflösung und wegen einer veränderten Plasmaausbildung zu einer stärkeren Partikelbeschleunigung.

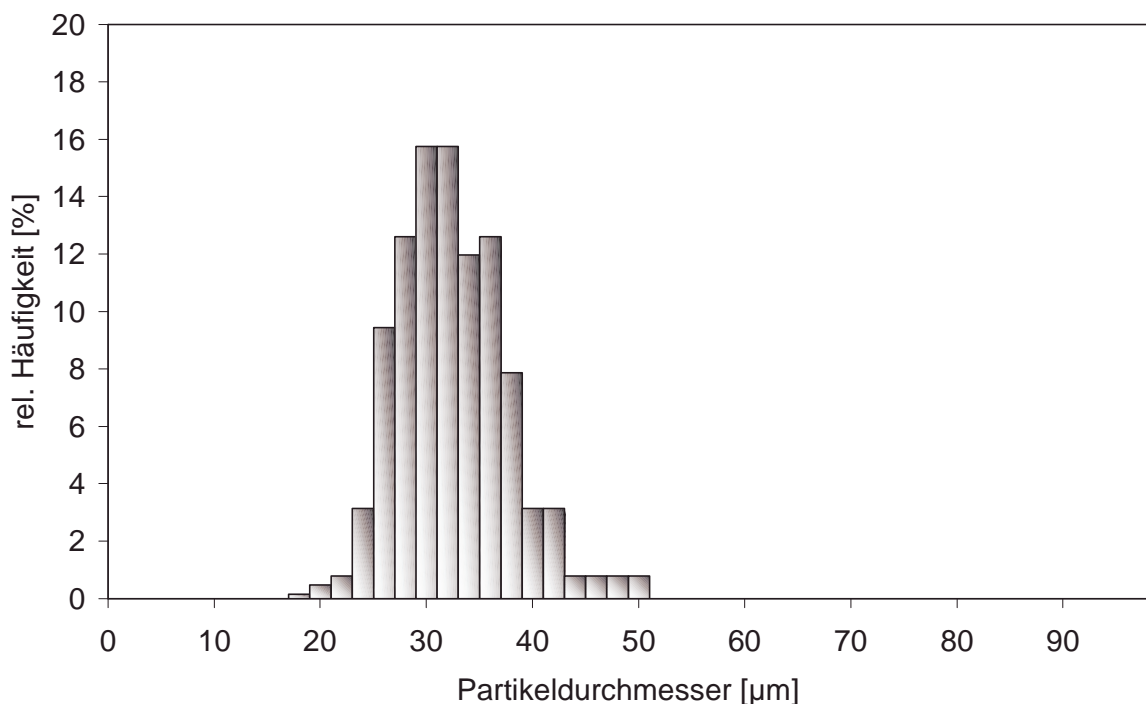


Abbildung 29: Korngrößenverteilung beim APS,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

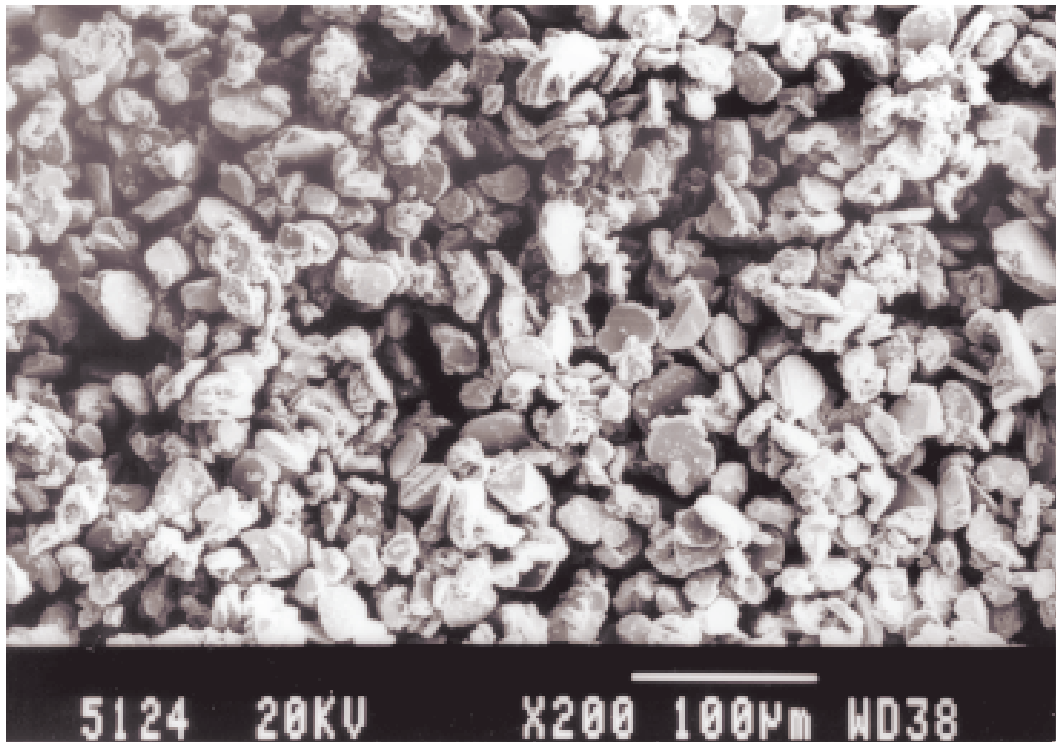


Abbildung 30: Mikroskopische Aufnahme des Spritzpulvers ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) beim APS

### 9.1 Ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung beim APS

Beim Beschichten wird Chromoxidpulver mit einer Körnung von  $25\ \mu\text{m}$  bis  $45\ \mu\text{m}$  aufgebracht, das eine hohe Verschleißfestigkeit aufweist. Der Düsendurchmesser betrug  $6\ \text{mm}$  und das Pulvereinschubrohr stand senkrecht zum Spritzstrahl. Als Grundmaterial wurde der Stahlblock verwendet, welcher schon bei den Vorversuchen eingesetzt wurde (Abbildung 8, S. 31). Vor dem Beschichten wurde die Oberfläche mit Korund gestrahlt, um eine optimale Schichthaftung zu garantieren. Die Bewegungseinheit führte die Spritzpistole mit einer Geschwindigkeit von  $0,2\ \text{m/s}$  über den Stahlblock.

Es wurde das in Kapitel 7.2 beschriebene Meßsystem zur kontinuierlichen Aufnahme von Zeitsignalen eingesetzt. Die eingestellte Abtastfrequenz betrug  $5,12\ \text{MHz}$ , als SE-Sensor diente der Panametrics  $1\ \text{MHz}$  (vergl. Kapitel 7.3, S. 37).

### 9.2 Betrachtung der Zeitsignale

Zur Trennung der Störsignale von den Nutzsignalen (SE-Signale infolge des Partikelauflaufpralls) wurden im folgenden die Zeitsignale mit einem Bandpaß zwischen

400 kHz und 2,5 MHz gefiltert (vergl. Abbildung 9, S. 33). Dabei ergibt sich beim Partikelauflaufprall ein Verlauf der Zeitsignale, der stark von einer Signalüberlagerung geprägt ist (Abbildung 31).

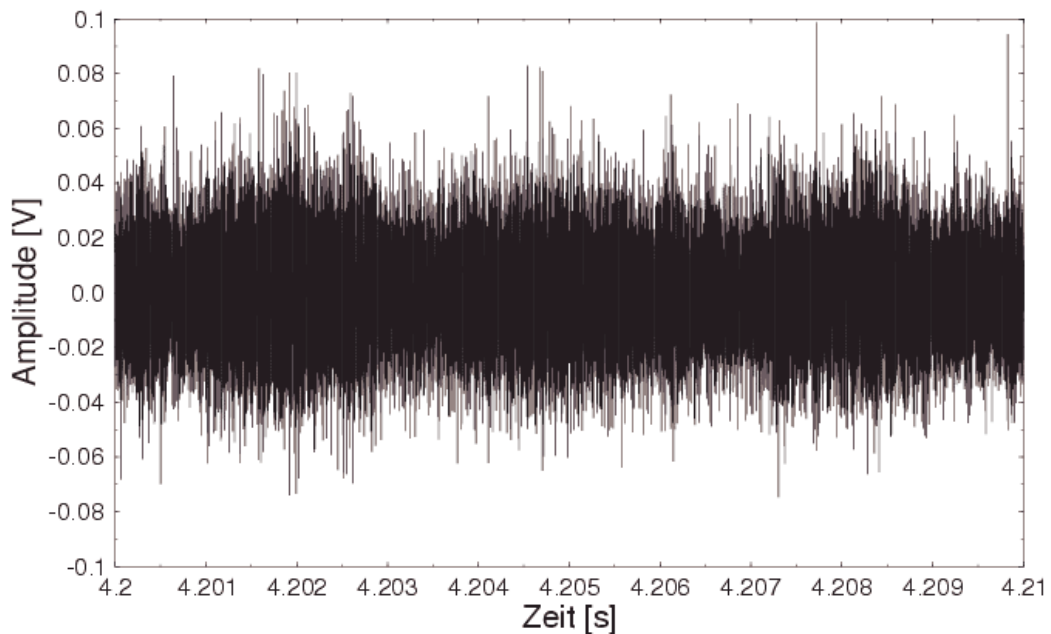


Abbildung 31: *Zeitsignal infolge des Partikelauflaufpralls, Bandpaß 0,4 - 2,5 MHz, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Bei der eingestellten Pulverfördertrate von 1 g/s entsteht eine hohe Anzahl von Spritzpartikeln (vergl. Tabelle 2, S. 25). Diese Partikel treffen größtenteils auf das Bauteil und verursachen dabei Körperschall.

Bewährte Methoden zur Auswertung von SE-Signalen wie das Setzen einer Triggerschwelle und die anschließende Bestimmung von charakteristischen Größen wie beispielsweise Maximalamplitude, Signaldauer und Anstiegszeit können wegen des kontinuierlichen Signalverlaufs zunächst nicht zum Einsatz kommen. Die alleinige Auswertung des RMS-Wertes, wie es bei kontinuierlichen SE-Signalen üblich ist, würde nicht ausreichen, um Aussagen über die Partikel- und Schichteigenschaften zu machen.

### 9.3 Einfluß von On-line-Prozeßparametern

Die Verminderung der Stromstärke beeinflusst u.a. das Aufschmelzverhalten der Spritzpartikel. Daraus resultiert eine geringere Auftragsrate und eine ungleichmäßige Schichtverteilung. Abbildung 32 stellt die entstehende bei „guten“ Bedingungen

(500 A) nach einer Überfahrt dar. Die Abbildungen bestehen aus zwei Teilen. Der obere Teil ist ein Querschliff; von unten nach oben sind das Substrat (weiß) und die Chromoxidschicht (grau) zu erkennen. Der untere Teil der Abbildung ist eine Draufsicht auf die Probe.

Abbildung 33 dokumentiert Querschliff und Draufsicht bei „schlechten“ Bedingungen, um den Unterschied zu verdeutlichen. Der Schichtauftrag ist geringer und ungleichmäßiger. Dies ist in beiden Ansichten erkennbar.



Abbildung 32: Mikroskopische Aufnahme (Querschliff, oben) und Oberflächenaufnahme (unten) bei  $I = 500$  A, Chromoxid, APS

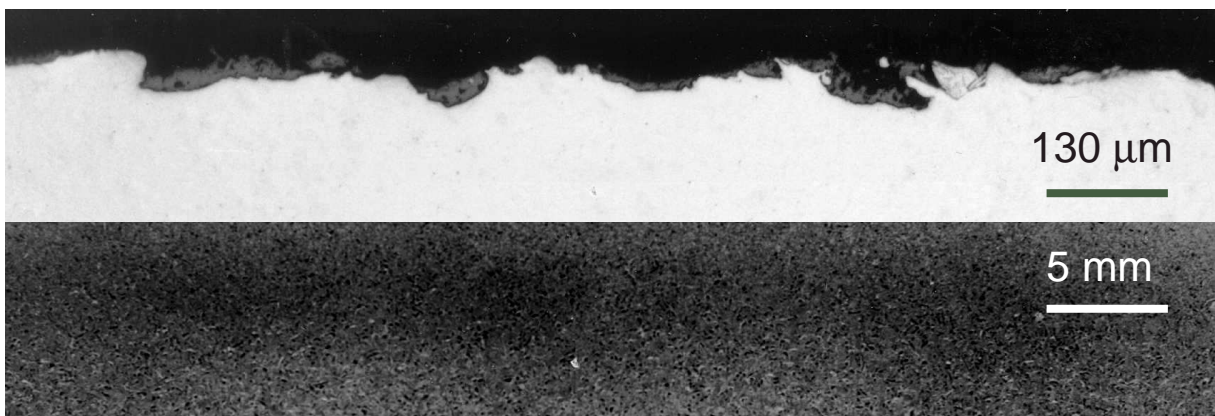


Abbildung 33: Mikroskopische Aufnahme (Querschliff, oben) und Oberflächenaufnahme (unten) bei  $I = 300$  A, Chromoxid, APS



### 9.3.1 Schmalbandige Auswertung der SE-Signale

Gelingt es, die anfallenden SE-Signale in ihrer Anzahl so zu reduzieren, daß diese noch genügend Informationen zur Beschreibung des komplexen Beschichtungsvorganges zu erhalten, so können weiterhin die bekannten Methoden zur Analyse von SE-Signalen angewendet werden.

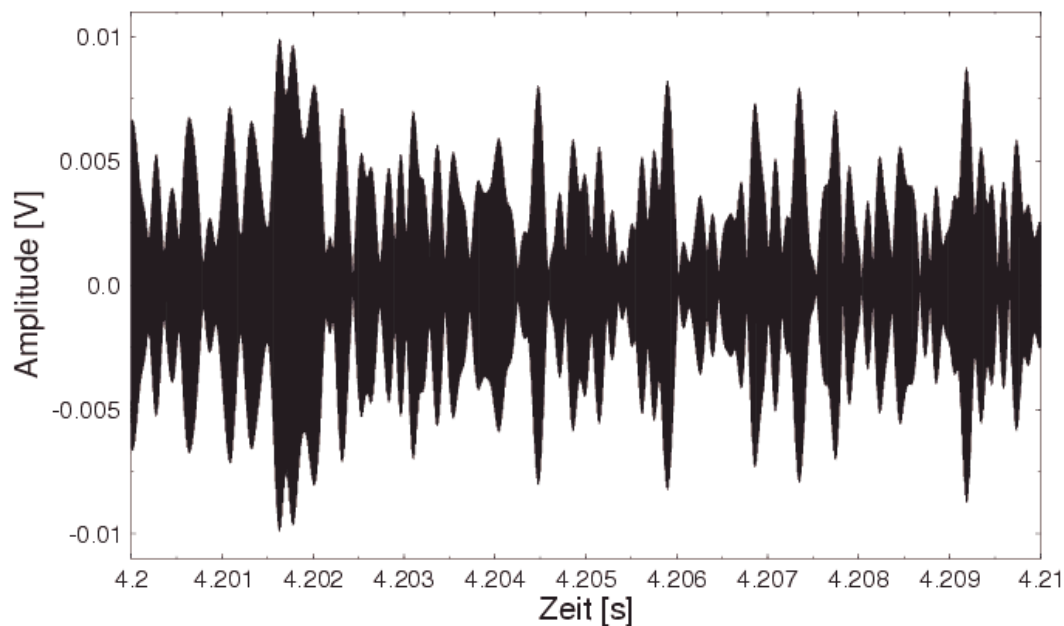


Abbildung 34: *Zeitsignal infolge des Partikelauflpralls, Bandpaß 0.74-0.75 MHz, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Zu diesem Zweck wurde im folgenden ein extrem schmaler Bandpaß (10 kHz) gesetzt und die aufgenommen Zeitsignale gefiltert. Der Frequenzbereich des Bandpasses wurde dabei einem Maximum im Frequenzverlauf der Zeitsignale angepaßt (vergl. Abbildung 15, Kapitel 7.3.4).

Die schmalbandige Filterung der Zeitsignale bewirkt eine Reduzierung der Datenmenge, so daß einzelne SE-Signale im Zeitverlauf erkennbar sind (Abbildung 34). Sie können jedoch nicht mehr den einzelnen Spritzpartikeln zugeordnet werden. Der so erhaltene Zeitverlauf läßt die Auswertung der SE-Signale mit Standardauswertemethoden zu. Dazu wurde der Zeitverlauf geglättet, eine Triggerschwelle festgelegt und anschließend die Amplitudenverteilung sowie Signalanzahl  $N$  bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 35 dargestellt.

Die so bestimmten Signalamplituden reichen von 2.5 mV (Triggerschwelle) bis 7.2 mV, dabei stellt sich ein Mittelwert von 3.6 mV ein (Abbildung 35). Die relative Häufigkeit nimmt zu großen Amplituden hin ab.

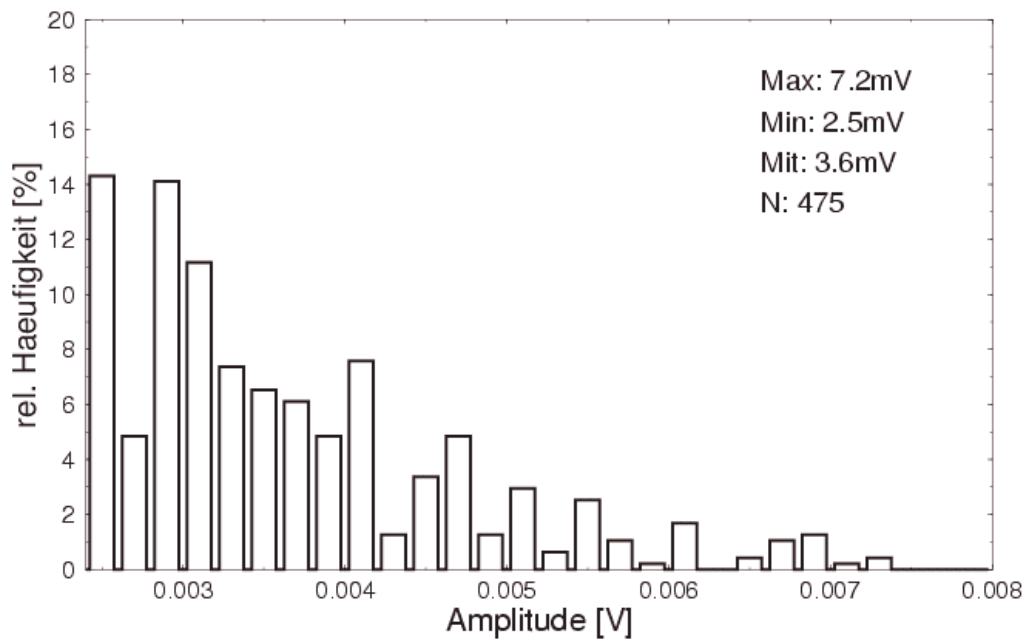


Abbildung 35: Amplitudenverteilung der SE-Signale, Bandpaß 0.74-0.75 MHz, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>

Um den Einfluß der Partikeleigenschaften auf die schmalbandig gefilterten SE-Signale zu untersuchen, wurde die Stromstärke (vergl. Abbildung 33 und Abbildung 32, S. 56) in zwei Schritten vermindert. Zu diesem Zweck wurden bei einer Stromstärke von 400 A und 250 A Beschichtungsversuche durchgeführt und die während einer Überfahrt entstehenden SE-Signale aufgenommen. Die Auswertung erfolgte wie bereits oben beschrieben; dabei wird die Amplitudenverteilung sowie die Signalanzahl bestimmt. Die Untersuchungen belegen einen Zusammenhang zwischen den SE-Signalen und der eingestellten Stromstärke (Abbildung 36).

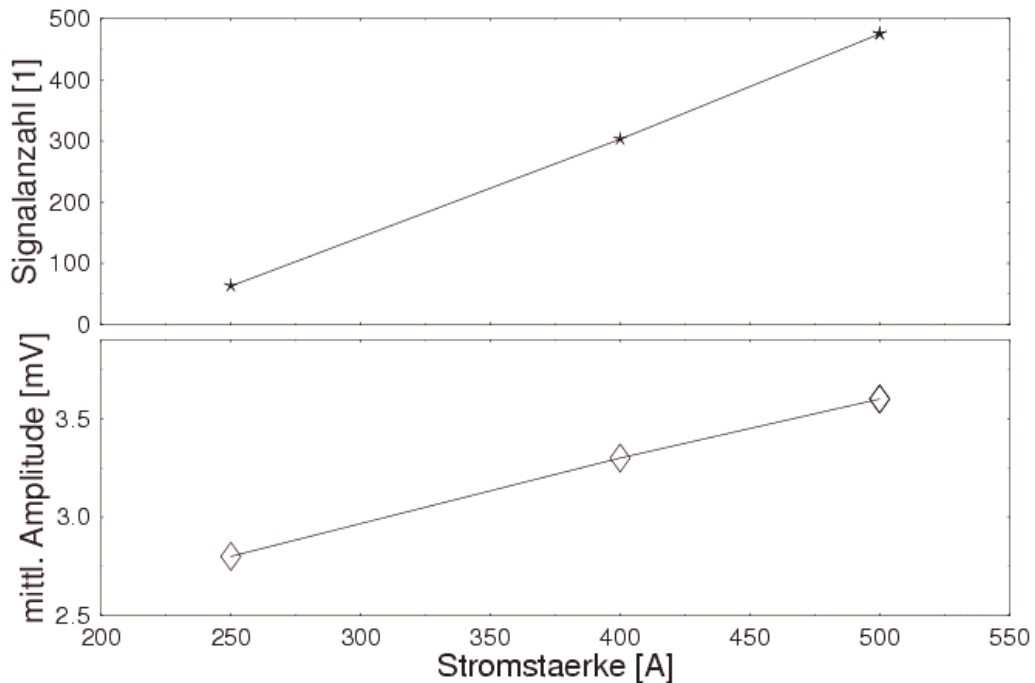


Abbildung 36: *Einfluß der Stromstärke auf die mittlere Amplitude und die Signalanzahl der SE-Signale während einer Überfahrt, Bandpaß 0.74-0.75 MHz, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Mit steigender Stromstärke nimmt sowohl die mittlere Amplitude als auch die Signalanzahl der schmalbandig gefilterten SE-Signale zu. Die durchgeführten Versuche dokumentieren, daß trotz extremer Signalüberlagerung ein Rückschluß auf den Spritzprozeß möglich ist.

### 9.3.2 Betrachtung des Frequenzspektrums

Neben der in der Schallemissionsanalyse üblichen Auswertung der Signale im Zeitbereich ist allgemein zur Schwingungsanalyse die Betrachtung des Frequenzspektrums eine gängige Methode. Im folgenden sollten die Möglichkeiten dieser Vorgehensweise zur Analyse der durch den Partikelauflauf erzeugten SE-Signale untersucht werden.

Zu diesem Zweck wurden aus den Zeitsignalen jeweils Blöcke von 8192 Punkten gelesen. Diese Blöcke entsprechen dann einem Zeitintervall von jeweils 1,6 ms, für diese Zeitintervalle wird das Frequenzspektrum ermittelt. Anschließend werden die Spektren dreidimensional dargestellt, um den zeitlichen Einfluß des Beschichtungsvorganges auf die Spektren zu dokumentieren. In dieser dreidimensionalen Darstellung sind die Spektren sowohl in der Frequenzachse als auch in der Zeitachse aus

Gründen der Übersichtlichkeit gemittelt. Diese Darstellung eignet sich zu einer ersten Beurteilung des Frequenzraums gut.

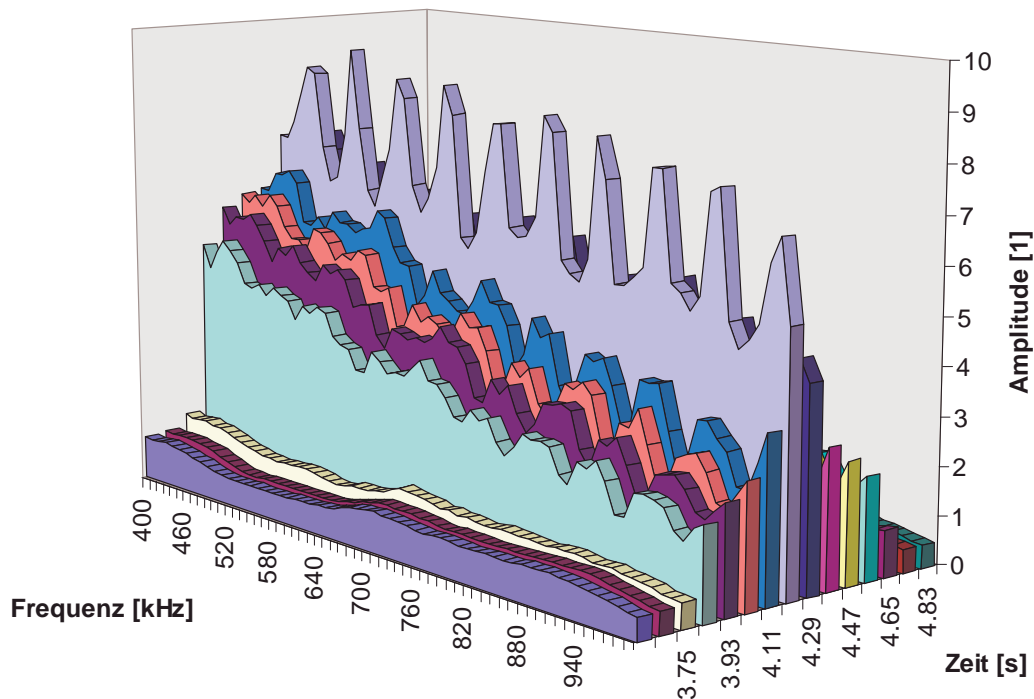


Abbildung 37: Frequenzspektrum in Abhängigkeit von der Überfahrzeit bei einer Stromstärke von 500A, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>

In Abbildung 37 sind die berechneten Frequenzen für die Zeitdauer einer Überfahrt der Spritzpistole über das zu beschichtende Bauteil bei einer Stromstärke von 500 A dargestellt. Die Zeit einer Überfahrt (ca. 1 s) wird maßgeblich durch die Vorschubgeschwindigkeit, die Bauteilabmessungen sowie den Durchmesser des Spritzspots beeinflusst. Die maximale Amplitude der SE-Signale wird erreicht, wenn sich die Spritzpistole direkt über der Bauteilmitte befindet. Das Frequenzspektrum ist geprägt von äquidistanten Maxima, die durch Eigenfrequenzen des Bauteils verursacht werden. Diese sind vornehmlich den (longitudinalen) Dickenschwingungen zuzuordnen.

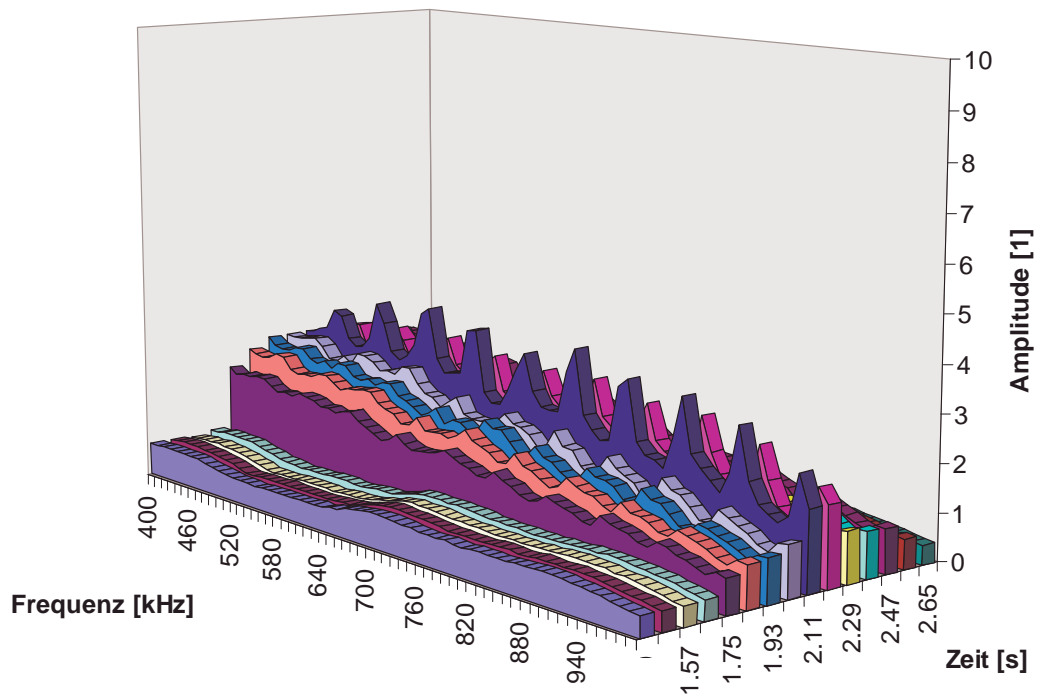


Abbildung 38: *Frequenzspektrum in Abhängigkeit von der Überfahrzeit bei einer Stromstärke von 300A, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Die Verminderung der Stromstärke auf 300 A führt zu einem prinzipiell ähnlichen Frequenzverlauf wie bei höheren Stromstärken. Wiederum sind die Frequenzmaxima infolge der Bauteileigenfrequenzen zu erkennen. Die Signalamplitude hat sich jedoch deutlich (auf ca. die Hälfte ihres ursprünglichen Betrages) verringert. Dieser Sachverhalt entspricht der in Abbildung 36 bereits dargestellten Stromstärkeabhängigkeit der Amplitude. Das Frequenzspektrum wird in dieser Darstellung eindeutig von den Bauteileigenfrequenzen dominiert – dies ist z.T. in der Mittelung der Daten begründet. Die Änderung der Signalamplitude im Spektrum bei Variation der Stromstärke scheint signifikant zu sein. Folglich wurden in den folgenden Kapiteln die Spektren tiefergehend untersucht.

### 9.3.3 Einfluß der Bauteilgeometrie auf das Frequenzspektrum

Es sollte im folgenden untersucht werden, inwieweit die Bauteilgeometrie das Frequenzspektrum der SE-Signale beeinflusst. Zu diesem Zweck wurde eine Probe aus St 37 mit den (geringeren) Abmessungen 5x40x20 mm<sup>3</sup> bei identischen Prozeßparametern beschichtet, auf der Rückseite wurden die SE-Signale aufgenommen und anschließend die Frequenzspektren bestimmt (Abbildung 39).

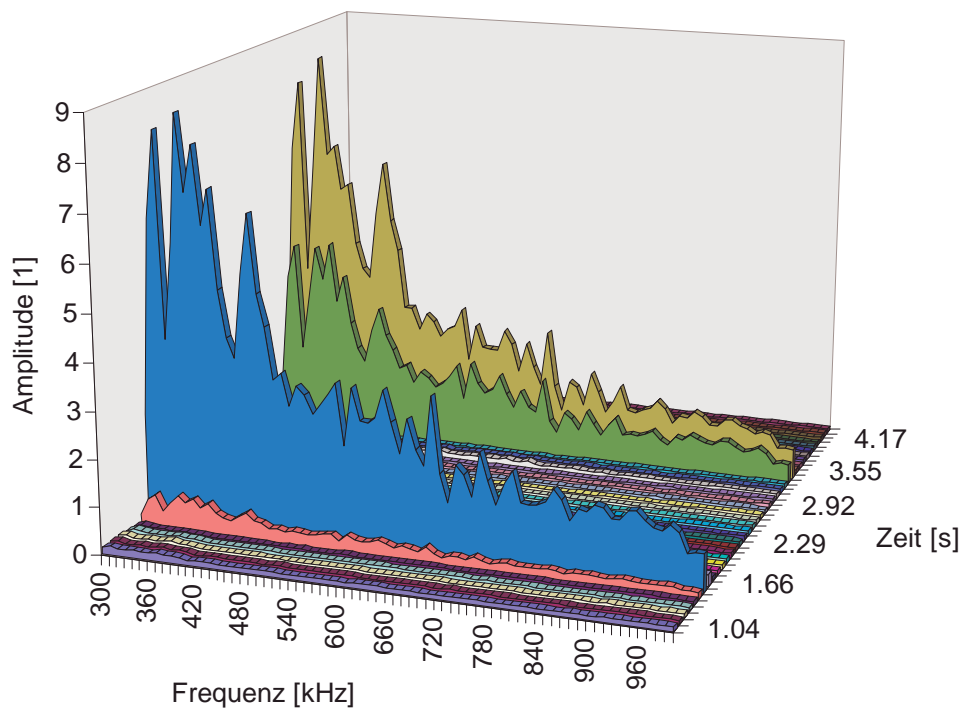


Abbildung 39: *Frequenzspektrum bei veränderter Bauteilgeometrie (St 37,  $5 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$ ), APS*

Bei Vergleich von Abbildung 39 und Abbildung 37 wird der Einfluß der Bauteilgeometrie auf das Frequenzspektrum deutlich. Trotz identischer Prozeßparameter bilden sich im Spektrum andere Frequenzmaxima und –minima aus. Diese Ergebnisse veranschaulichen, daß man entweder nur die Frequenzspektren einer bestimmten Bauteilgeometrie miteinander vergleichen kann oder den Einfluß der Bauteilgeometrie ermitteln und herausrechnen muß.

### 9.3.4 Test auf Normalverteilung der Frequenzspektren

Zur weiteren Untersuchung sollen über die Überfahrzeit gemittelte Frequenzspektren verglichen werden. Dies hat den Vorteil einer erheblichen Datenreduzierung: Statt ca. 750 Frequenzspektren pro Überfahrt (Überfahrzeit 1 s) muß nur ein Spektrum ausgewertet werden. Die Verwendung eines gemittelten Frequenzspektrums ist zulässig, wenn durch die Mittelung keine signifikanten Informationen verloren gehen. Dazu ist eine hinreichende Bedingung, daß die Amplitudenwerte der Spektren normalverteilt sind. Aus diesem Grund wurde im folgenden die Verteilungsfunktion ermittelt und auf Normalverteilung hin untersucht.

Die kontinuierlich gemessenen Zeitsignale (Abtastfrequenz 5,12 MHz) werden in Blöcken von 4096 Punkten eingelesen. Somit bestehen die daraus berechneten Frequenzspektren aus 2048 Stützpunkten. Für einen Zeitraum von 1 Sekunde werden 750 Spektren eingelesen und über der Zeit gemittelt. An jedem Stützpunkt dieser 750 Spektren wird die Verteilung bestimmt. Dabei werden die Amplitudenwerte in 10 Klassen eingeteilt. Es entstehen folglich 2048 Verteilungen mit jeweils 750 Meßwerten, welche 10 Klassen zugeordnet sind. Abbildung 40 stellt diesen Ablauf übersichtlich dar.

- ◆ Aufnahme des Zeitsignals (Abtastfrequenz 5,12 MHz, Dauer 1 s) während des Beschichtens (Überfahrt)
- ◆ Unterteilen des Zeitsignals (1 s) in 750 Blöcke von 4096 Punkten
- ◆ Berechnen der Amplituden-Frequenzspektrums (750 Spektren mit je 2048 Punkten)
- ◆ Bestimmung der Amplitudenverteilungen (10 Klassen)

Abbildung 40: Berechnung der Amplitudenverteilung

Zur Prüfung auf Normalverteilung wird  $\chi^2$ -Test verwendet [79]. Zunächst sind für den Erwartungswert  $\mu$  und für die Standardabweichung  $\sigma$  Schätzwerte zu ermitteln. Dies geschieht nach Gleichung 7 und Gleichung 8.

Gleichung 7 
$$\mu = F_{mit} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i$$

Gleichung 8 
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - F_{mit})^2}{n-1}}$$

- $F_{mit}$  := gemittelttes Frequenzspektrum  
 $F_i$  :=  $i$ -tes Frequenzspektrum  
 $n$  := Anzahl der Spektren im betrachteten Zeitraum  
 $\mu$  := Erwartungswert (geschätzt)  
 $\sigma$  := Standardabweichung (geschätzt)

In Abbildung 41 ist die Verteilung der Amplitudenwerte aus den Spektren bei einer beliebig gewählten Frequenz von 800 kHz (Bauteileigenfrequenz) dargestellt.

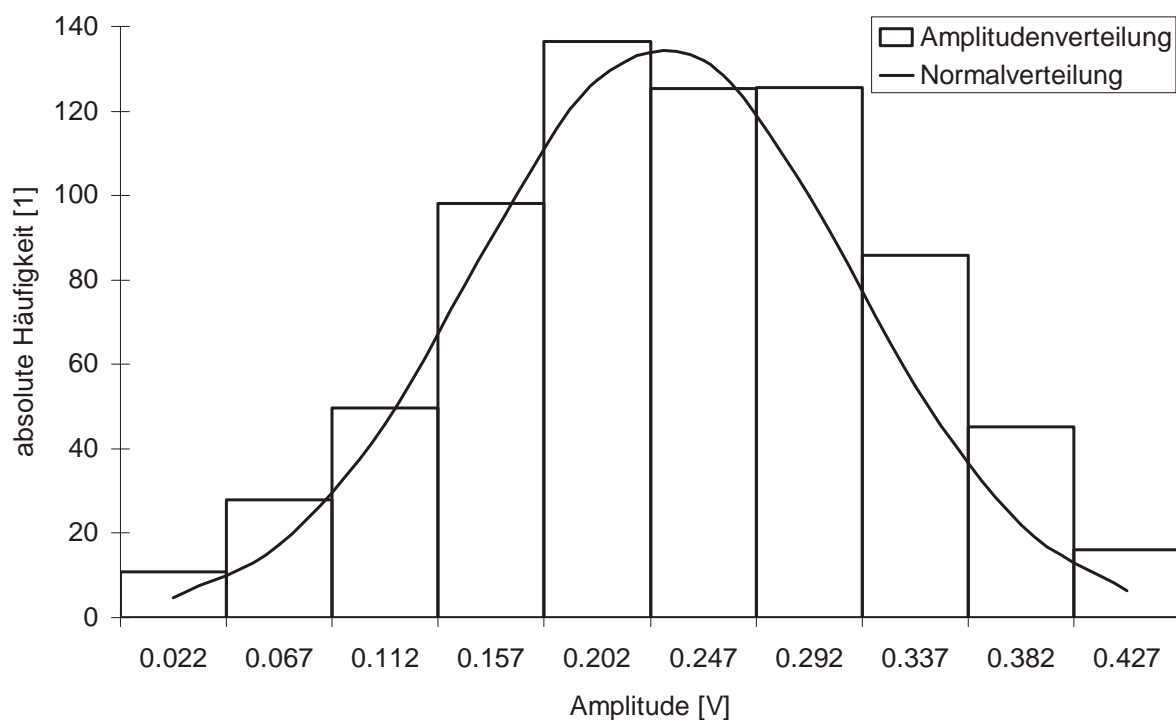


Abbildung 41: Vergleich der Amplitudenverteilung mit der Normalverteilung beim APS, Frequenz 800 kHz, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>: die Schätzwerte ergeben für den Erwartungswert  $\mu$  zu 0,24 V und für die Standardabweichung  $\sigma$  zu 0,09 V)

| $u_m$ [V]   | $o_m$ [V] | $h_m$ | $a_m = \frac{o_m - \mu}{\sigma}$ | $\Phi(a_m)$ | $p_m = \Phi(a_m) - \Phi(a_{m-1})$ | $\frac{(h_m - np_m)^2}{np_m}$   |
|---|-----------|-------|----------------------------------|-------------|-----------------------------------|---|
| 0   | 0.0445    | 10    | -2.172                           | 0.015       | 0.021                             | 1.698   |
| 0.0046  | 0.0895    | 28    | -1.672                           | 0.047       | 0.032                             | 1.005   |
| 0.0896  | 0.1345    | 49    | -1.172                           | 0.121       | 0.073                             | 0.242   |
| 0.1346  | 0.1795    | 98    | -0.672                           | 0.251       | 0.130                             | 0.234   |
| 0.1796  | 0.2245    | 136   | -0.172                           | 0.432       | 0.181                             | 0.305   |
| 0.2246  | 0.2695    | 125   | 0.328                            | 0.628       | 0.197                             | 1.843   |
| 0.2696  | 0.3145    | 125   | 0.828                            | 0.796       | 0.168                             | 0.192   |
| 0.3146  | 0.3595    | 85    | 1.328                            | 0.908       | 0.112                             | 0.295   |
| 0.3596  | 0.4045    | 45    | 1.828                            | 0.966       | 0.058                             | 0.241   |
| 0.4046  | 0.4495    | 16    | 2.328                            | 0.990       | 0.024                             | 0.069   |
| $u_m$ := untere Klassengrenze<br>$o_m$ := obere Klassengrenze<br>$h_m$ := absolute Häufigkeit<br>$a_m$ := oberer Klassengrenze (standardisiert)<br>$\Phi$ := standardisierte Normalverteilung<br>$\chi^2$ = Testergebnis<br>$\chi^2_{0,05;7}$ := Vergleichsgröße (Signifikanzniveau 0,05, 7 Freiheitsgrade) |           |       |                                  |             |                                   | $\chi^2 = 6.123$<br>$\chi^2_{0,05;7} = 14,1$<br><div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"><math>\chi^2 &lt; \chi^2_{0,05;7}</math></div> |



Tabelle 5: Nachweis der Normalverteilung mit dem  $\chi^2$ -Test. Erwartungswert  $\mu=0,24$  V, Standardabweichung  $\sigma=0,09$ ,  $\chi^2=6.123$ .

Tabelle 5 dokumentiert das Ergebnis des  $\chi^2$ -Tests: die Werte sind normalverteilt. Die Anzahl der Freiheitsgrade für die Vergleichsgröße  $\chi^2_{0,05;7}$  ergibt sich aus

$$\text{Gleichung 9} \quad q = k-1-j = 10-1-2 = 7$$

$q$  := Anzahl Freiheitsgrade  
 $k$  := Anzahl Häufigkeitsklassen (10)  
 $j$  := Anzahl festgelegte Parameter (2: Erwartungswert und Standardabweichung)

Damit ist die Bedingung für Normalverteilung  $\chi^2 < \chi^2_{0,05;7}$  erfüllt.

### 9.3.5 Bauteil- und werkstoffunabhängige Frequenzspektren

Die in den bisherigen Kapiteln dargestellten Spektren sind u.a. durch die Eigenfrequenzen des zu beschichtenden Bauteils geprägt. Die entstehenden Eigenfrequenzen werden maßgeblich bestimmt von der Bauteilgeometrie und seinem Werkstoff.

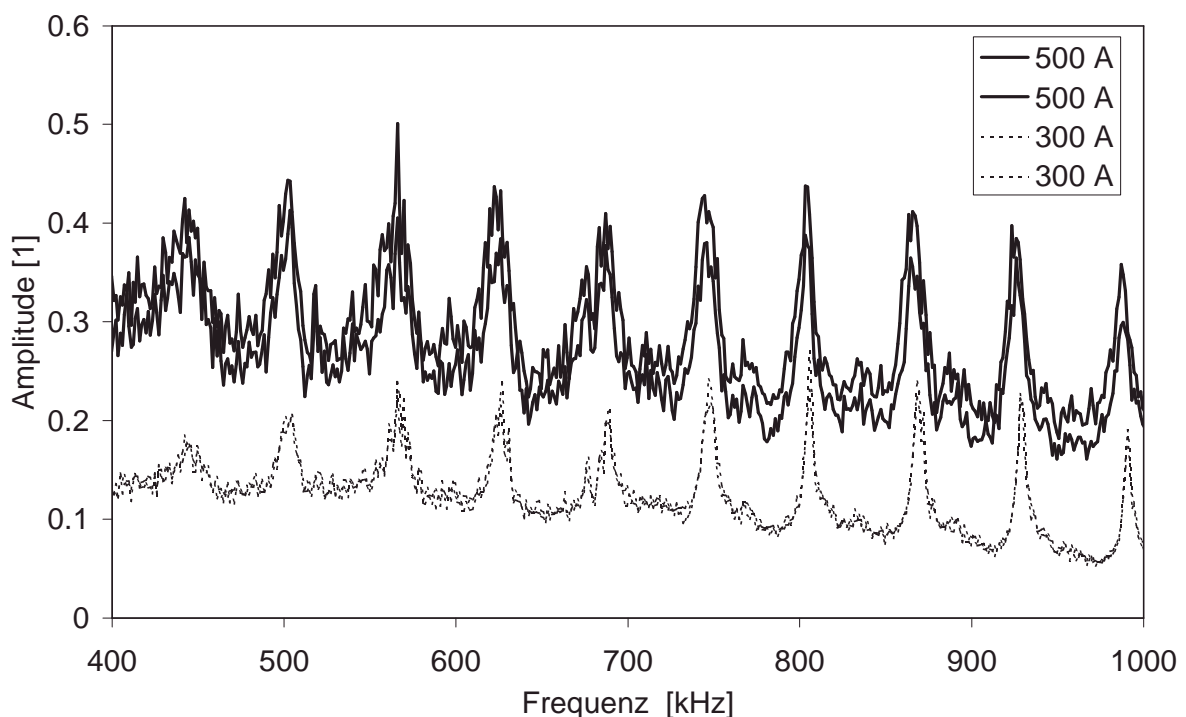


Abbildung 42: Gemittelte Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Stromstärken, APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>

Die Zuordnung der Spektren zu den unterschiedlichen Prozesszuständen gelang bis zu diesem Punkt über die Signalamplitude (vergl. Abbildung 37 und Abbildung 38).

Allein die Signalamplitude erscheint jedoch nicht ausreichend, um den komplexen, von vielen nicht on-line regelbaren Parametern beeinflussten Beschichtungsprozeß zu überwachen. Auch wäre die Betrachtung normierter (normiert auf die Maximalamplitude) Spektren nicht sinnvoll, da dadurch genau diese Amplitudeninformation verloren geht.

Abbildung 42 zeigt nochmals den Einfluß der Stromstärke auf die entstehenden Spektren und deren Signalamplituden. Für jeden Prozeßzustand (300 A und 500 A) sind 2 mittlere Frequenzspektren aus an 2 verschiedenen Versuchstagen durchgeführten Beschichtungsversuchen dargestellt.

Neben den Eigenfrequenzen sind weitere Frequenzanteile sichtbar. Es soll untersucht werden, ob anhand dieser Frequenzanteile die beiden Prozeßzustände unterschieden werden können. Diese Frequenzanteile werden ggf. durch unterschiedliche Eigenschaften der Spritzpartikel verursacht und stehen deswegen im Mittelpunkt der weiteren Untersuchungen. Diese Frequenzanteile müssen von den Eigenfrequenzen getrennt werden, nur so ist eine bauteilunabhängige Überwachung des thermischen Spritzprozesses realisierbar.

Gleichung 10 
$$f_n = \frac{c}{2l} n$$

$f$  := Eigenfrequenz  
 $c$  := Schallgeschwindigkeit  
 $l$  := Bauteildicke  
 $n$  := Index

Gleichung 10 beschreibt den Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit  $c$ , der Bauteilabmessung und den entstehenden longitudinalen Eigenfrequenzen. Ausgehend von einer Bauteildicke von 50 mm sowie einer Schallgeschwindigkeit  $c$  von 5900 m/s lassen sich so die longitudinalen Dickenschwingungen in dem verwendeten Stahlblock mit den Abmessungen 50x160x160 mm<sup>3</sup> abschätzen: es entstehenden Eigenfrequenzen in einem Abstand von ca. 60 kHz. Genau diese Eigenfrequenzen lassen sich in den dargestellten Frequenzspektren (Abbildung 42) nachweisen.

Um diese Eigenfrequenzen aus den gemessenen Frequenzspektren zu eliminieren, bietet es sich an, die vorliegenden Spektren (und nicht das ursprüngliche Zeitsignal) einer Frequenz-Filterung zu unterwerfen. Dabei wird das Cepstrum, die Frequenz-

analyse des 1. Frequenzspektrums gebildet und gefiltert (abgeschnitten). Anschließend führt eine inverse FFT zurück zu einem gefilterten Frequenzspektrum. Tabelle 6 stellt die Vorgehensweise übersichtlich dar.

|            | <b>Fall A: Eliminieren der Bauteileigenfrequenzen aus dem Frequenzspektrum</b>   | <b>Fall B: Eliminieren aller anderen Frequenzanteile (außer Bauteileigenfrequenzen) aus dem Frequenzspektrum</b>  |
|------------|--|---|
| 1. Schritt | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Messung Zeitsignal</li> <li>◆ Ergebnis: Abbildung 31</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Messung Zeitsignal</li> <li>◆ Ergebnis: Abbildung 31</li> </ul>  |
| 2. Schritt | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Frequenzspektrum = FFT vom Zeitsignal</li> <li>◆ Ergebnis: Abbildung 41</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Frequenzspektrum = FFT vom Zeitsignal</li> <li>◆ Ergebnis: Abbildung 41</li> </ul>   |
| 3. Schritt | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ FFT vom Frequenzspektrum (<b>Cepstrum</b>)</li> <li>◆ Filterung der <i>Bauteileigenfrequenzen</i></li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ FFT vom Frequenzspektrum (<b>Cepstrum</b>)</li> <li>◆ Filterung <i>aller Frequenzanteile außer Bauteileigenfrequenzen</i></li> </ul> |
| 4. Schritt | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ inverse FFT</li> <li>◆ Ergebnis: <i>Frequenzspektrum ohne Bauteileigenfrequenzen</i>, Abbildung 45, Abbildung 46</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ inverse FFT</li> <li>◆ Ergebnis: <i>Frequenzspektrum nur mit Bauteileigenfrequenzen</i>, Abbildung 43</li> </ul>                     |

*Tabelle 6: Vorgehensweise zur Bestimmung bauteil- und werkstoffunabhängiger Frequenzspektren (Fall A), Ermittlung der Bauteileigenfrequenzen aus den gemessenen Zeitsignalen (Fall B)*

Zur Überprüfung der in Tabelle 6 beschriebenen Vorgehensweise werden zunächst nicht die Bauteileigenfrequenzen, sondern alle anderen Frequenzanteile eliminiert (Tabelle 6, Fall B). Demnach sollten sich Frequenzspektren nur mit Bauteileigenfrequenzen unabhängig von der Stromstärke ergeben (Abbildung 43). Die bei verschiedenen Stromstärken (300 A und 500 A) aufgenommenen Eigenfrequenzverläufe überlagern sich (Abbildung 43) und es ist eine starke Ähnlichkeit erkennbar. Um diese Ähnlichkeit objektiv zu bewerten, wird der Korrelationskoeffizient zwischen den ermittelten Eigenfrequenzspektren ermittelt. Der Korrelationskoeffizient  $r$  wird nach Gleichung 11 bestimmt.

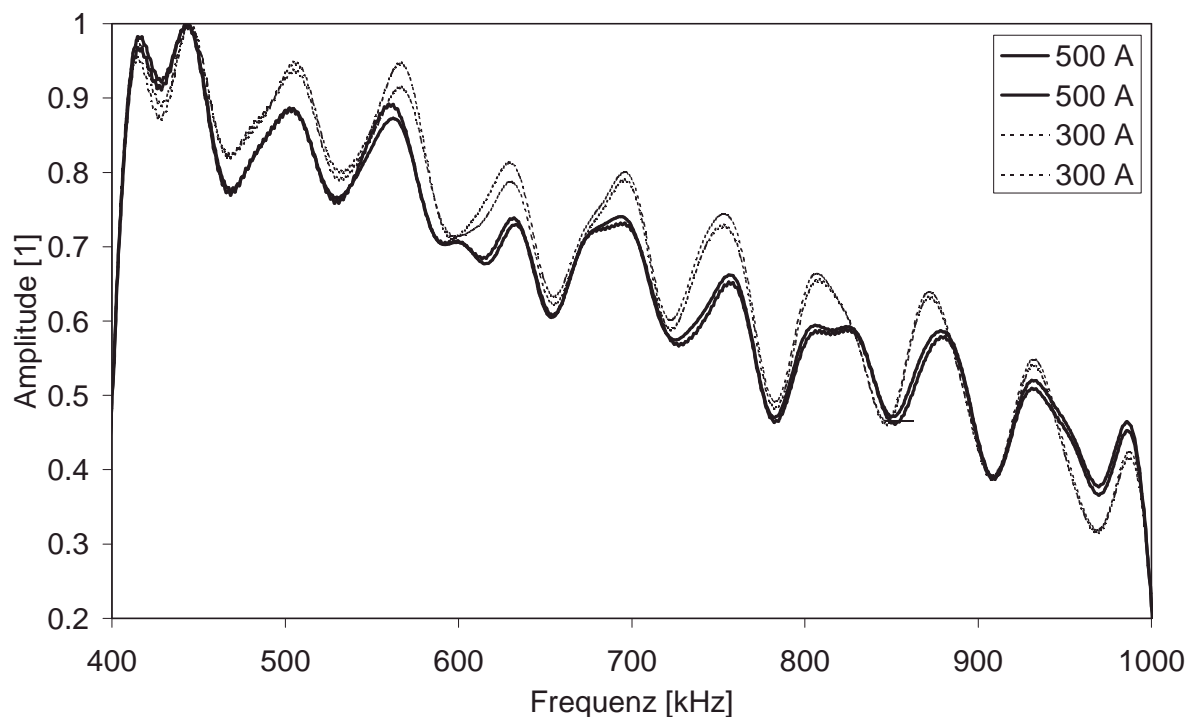


Abbildung 43: Eigenfrequenzen (siehe Tabelle 6, Fall B), Bauteil: Stahlblock  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$

Gleichung 11

$$r = \frac{\sum_{i=1}^i x_i y_i - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^i x_i \right) \left( \sum_{i=1}^i y_i \right)}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^i x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^i x_i \right)^2 \right) \left( \sum_{i=1}^i y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^i y_i \right)^2 \right)}}$$

$r$  := Korrelationskoeffizient  
 $x_i$  := Datensatz 1 = Frequenzspektrum 1  
 $y_i$  := Datensatz 2 = Frequenzspektrum 2

Die Korrelationsanalyse basiert auf der Voraussetzung, daß zwei Variable – in diesem Fall  $x$  (= Frequenzspektrum 1) und  $y$  (= Frequenzspektrum 2) – eine zweidimensionale verbundene Normalverteilung haben. Faßt man  $y$  als Parameter auf und legt dessen Werte willkürlich fest und erhält so die Werte der abhängigen Variable  $x$ , so besteht eine lineare Regression. Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen  $-1$  und  $1$  annehmen. Ist der Betrag des Korrelationskoeffizienten gleich  $1$ , so besteht eine maximale Ähnlichkeit -  $r$  ist in diesem Fall  $100\%$  - zwischen den Variablen; ist  $r$  gleich  $0$ , so besteht kein Zusammenhang zwischen den Variablen /80/.

Zur Beurteilung der Eigenfrequenzen wurde der Korrelationskoeffizient zwischen den bei verschiedenen Stromstärken (300 A und 500 A) ermittelten Eigenfrequenzspektren bestimmt. Darüber hinaus wurde der Korrelationskoeffizient auch zwischen verschiedenen Messungen bei identischer Stromstärke ermittelt, um eine Vergleichsgröße zu haben. Das Balkendiagramm in Abbildung 44 enthält die Ergebnisse dieser Berechnungen.

Der Korrelationskoeffizient liegt sowohl zwischen den Eigenfrequenzspektren bei identischen als auch bei verschiedenen Prozeßbedingungen über 99 %, damit ist hier von einer starken Ähnlichkeit auszugehen. Die in Tabelle 6 beschriebene Vorgehensweise ist folglich zur Ermittlung der Eigenfrequenzspektren geeignet.

Darauf aufbauend sollen die nach Tabelle 6 (Fall A) ermittelten Spektren ohne Eigenfrequenzanteile ermittelt werden. Das Ergebnis einer solchen Filterung ist in (Abbildung 45) dargestellt.

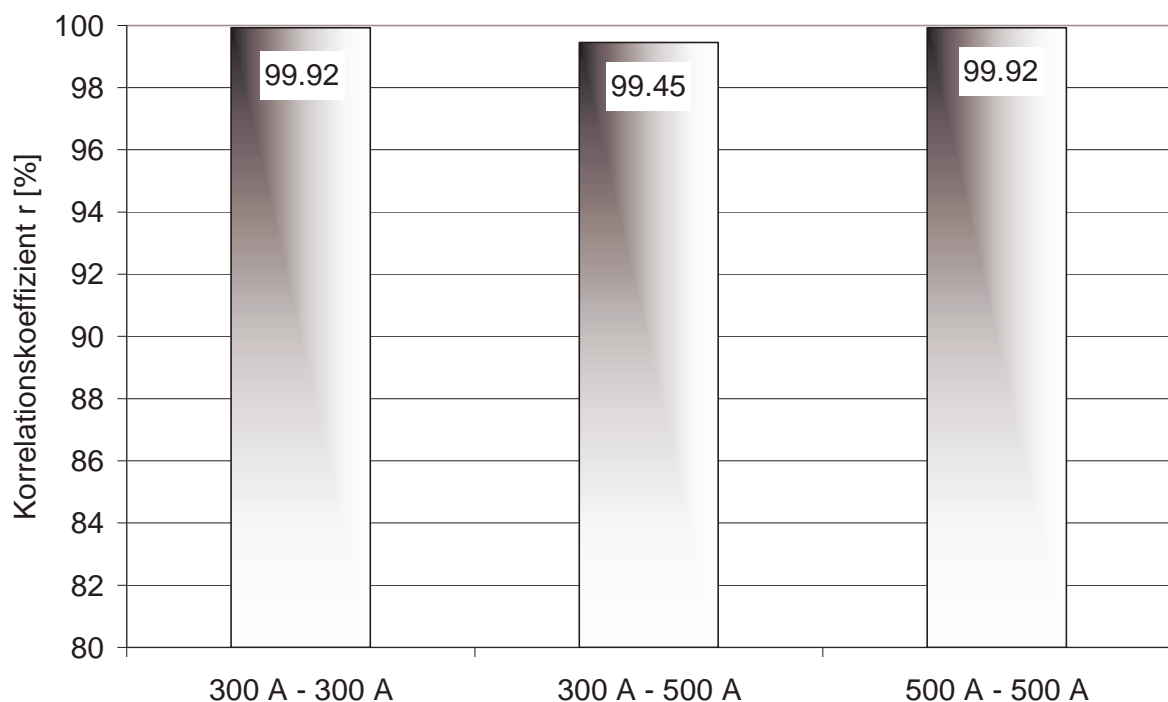


Abbildung 44: Korrelationskoeffizient  $r$  zwischen den Eigenfrequenzverläufen bei verschiedenen Prozeßzuständen, Basis: 3000 Frequenzspektren

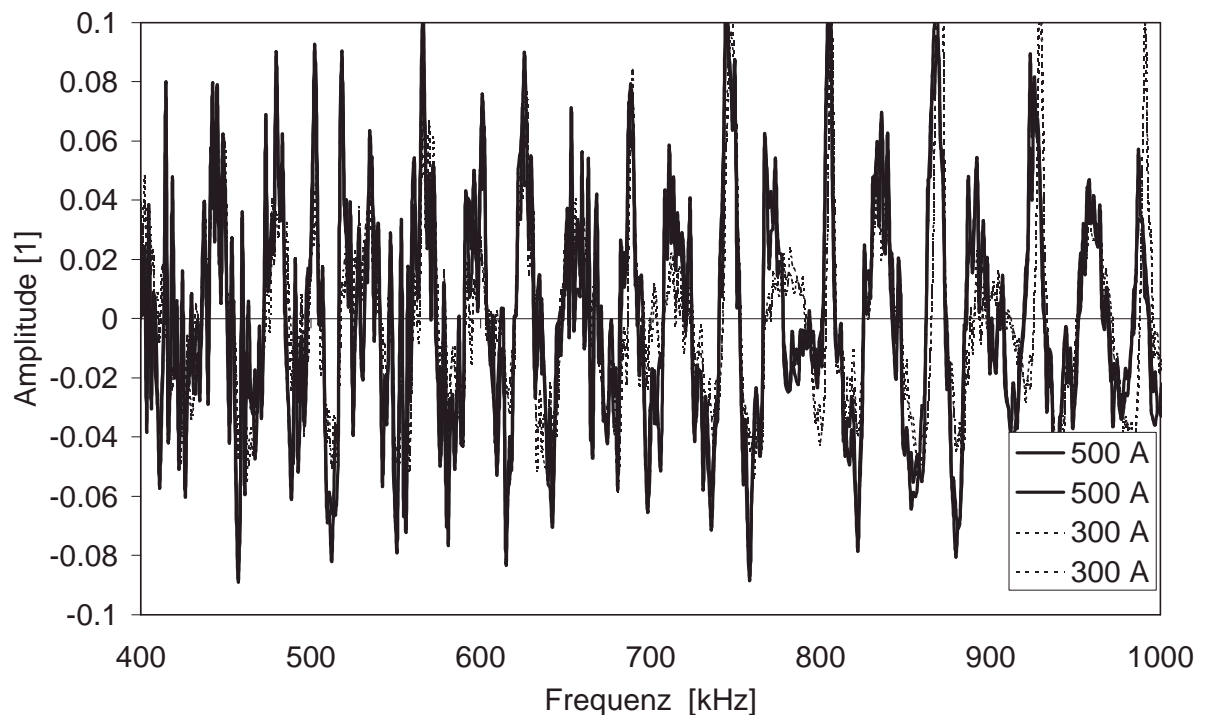


Abbildung 45: *Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Stromstärken, Eigenfrequenzen herausgefiltert (siehe Tabelle 6, Fall A), APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

In Abbildung 45 sind die gefilterten Frequenzverläufe für verschiedene Prozeßzustände (300 A und 500 A) dargestellt. Die Verläufe überlagern sich, es können sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede festgestellt werden. Durch die Spreizung der Frequenzachse (Abbildung 46) wird dieser Sachverhalt etwas deutlicher. Frequenzverläufe aufgenommen bei gleicher Stromstärke sind nahezu identisch, während sich die Frequenzverläufe aufgenommen bei verschiedenen Stromstärken zwar nicht stark, aber mit bloßem Auge erkennbar voneinander unterscheiden.

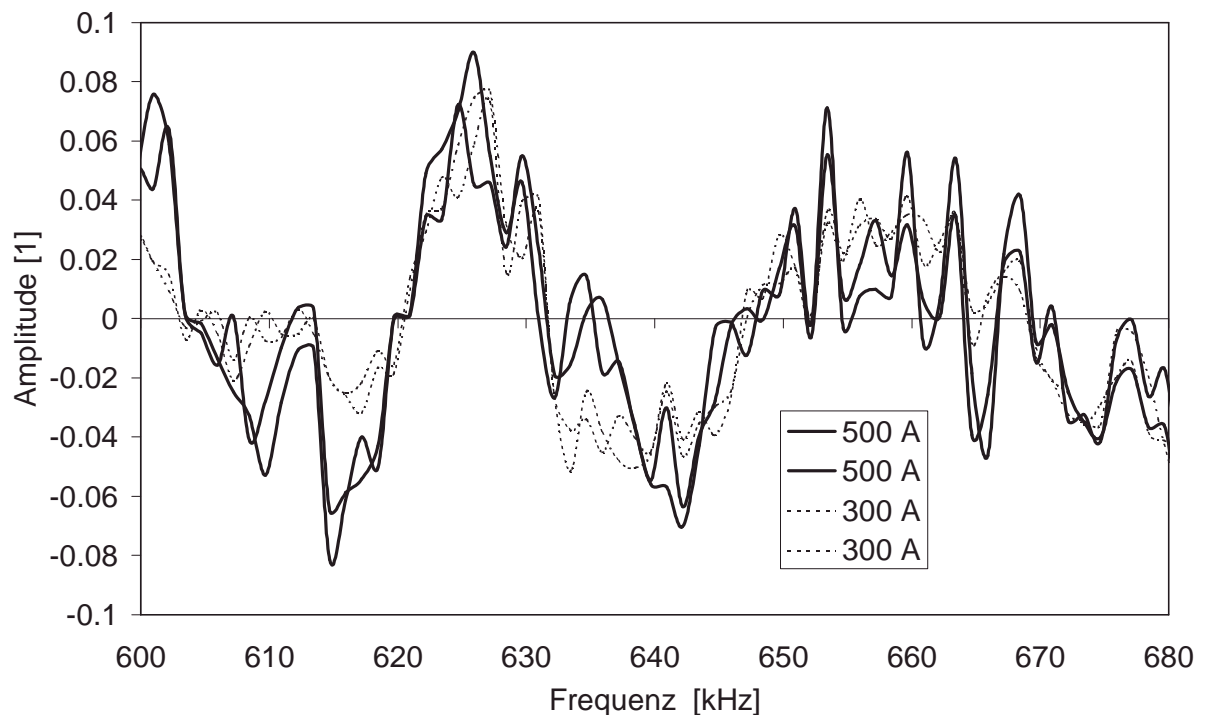


Abbildung 46: *Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Stromstärken, Eigenfrequenzen herausgefiltert (siehe Tabelle 6, Fall A), APS, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Auch dieser Zusammenhang soll mittels des Korrelationskoeffizienten (Gleichung 11) objektiv bewertet werden. Zu diesem Zweck werden – genau wie bei der Untersuchung der Eigenfrequenzspektren in Abbildung 44 – 3 Korrelationskoeffizienten gebildet (Abbildung 47). Dabei wird deutlich, daß die Korrelationskoeffizienten bei identischen Prozeßzuständen (in Abbildung 47 gekennzeichnet durch 300 A – 300 A und 500 A – 500 A) hohe Werte von über 97 % annehmen. Bildet man im Vergleich dazu den Korrelationskoeffizient zwischen zwei verschiedenen Prozeßzuständen (in Abbildung 47 gekennzeichnet durch 300 A – 500 A) so stellt sich ein deutlich geringerer Wert von 69,2 % ein. Diese Untersuchung belegt, daß auf der Basis der entstehenden Frequenzverläufe im zu beschichtenden Bauteil eine Erkennung der unterschiedlichen Prozeßzustände möglich sein sollte.

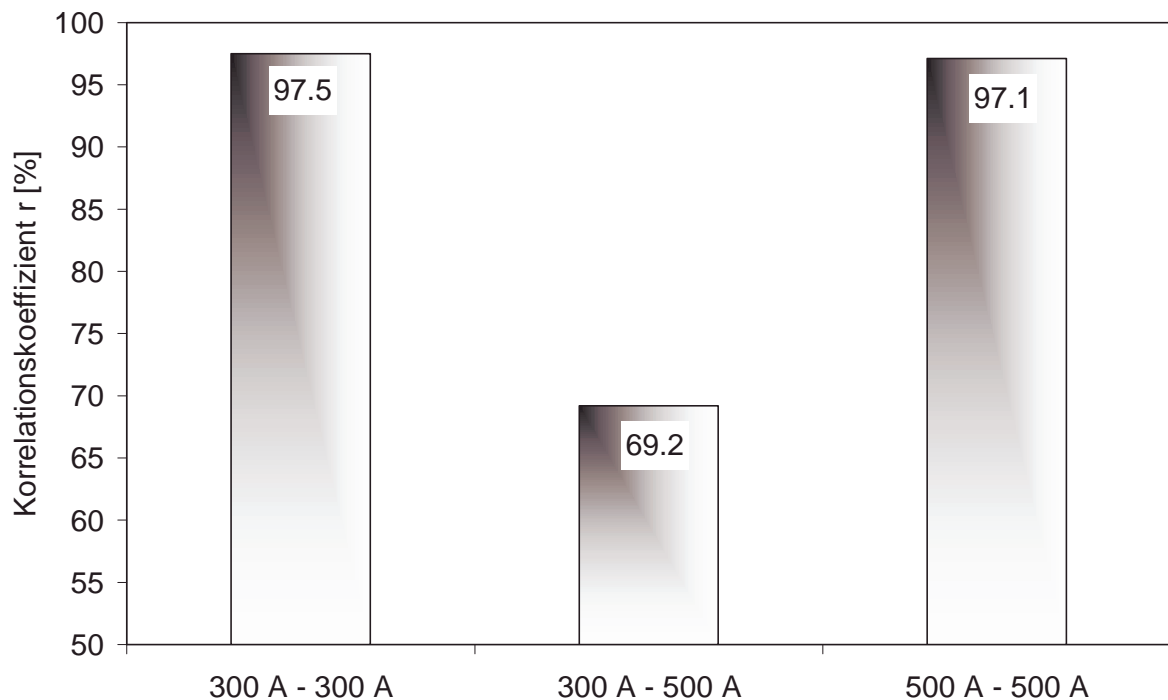


Abbildung 47: Korrelationskoeffizient  $r$  der gefilterten Spektren bei identischen und verschiedenen Prozeßzuständen, Basis: 3000 Frequenzspektren

Sämtliche o.b. Ergebnisse beziehen sich auf einen Frequenzbereich zwischen 400 kHz und 1 MHz. Dieser Frequenzbereich ist nach unten begrenzt, um elektromagnetische Störsignale auszuschließen. Die obere Grenze von 1 MHz ist zunächst rein willkürlich gewählt, um den Bereich der stärksten Signalamplituden auszuwerten. Im folgenden sollte untersucht werden, ob sich schmalere Frequenzbänder besser eignen, um verschiedene Prozeßzustände akustisch zu erkennen. Zu diesem Zweck wurden Bandbreiten von jeweils 100 kHz gewählt und die entwickelten Auswerterroutinen auf diese angewendet. Dabei wurden zwei Korrelationskoeffizienten gebildet: zum einen zwischen SE-Signalen, welche bei identischen (500 A-500 A) und zum anderen welche bei verschiedenen (300 A-500 A) Prozeßbedingungen aufgenommen worden sind. Ziel war es, Frequenzbereiche zu ermitteln, welche identischen Prozeßbedingungen einen hohen Korrelationskoeffizienten zuweisen und gleichzeitig verschiedene Prozeßbedingungen durch möglichst geringe Korrelationskoeffizienten erkennen lassen.

Abbildung 48 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen: in einem Frequenzbereich zwischen 800 kHz und 1400 kHz kommt es zu einem Absinken des Korrelationskoeff-



fizienten, welcher zwei Spritzprozesse bei 300 A und 500 A vergleicht, auf einen Wert unter 30 %. Gleichzeitig bleiben die Korrelationskoeffizienten für identische Prozeßbedingungen bei über 97 %. Das bedeutet, daß in diesem Frequenzbereich und beim untersuchten Bauteil (Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>) Prozeßabweichungen sehr deutlich erkannt werden können.

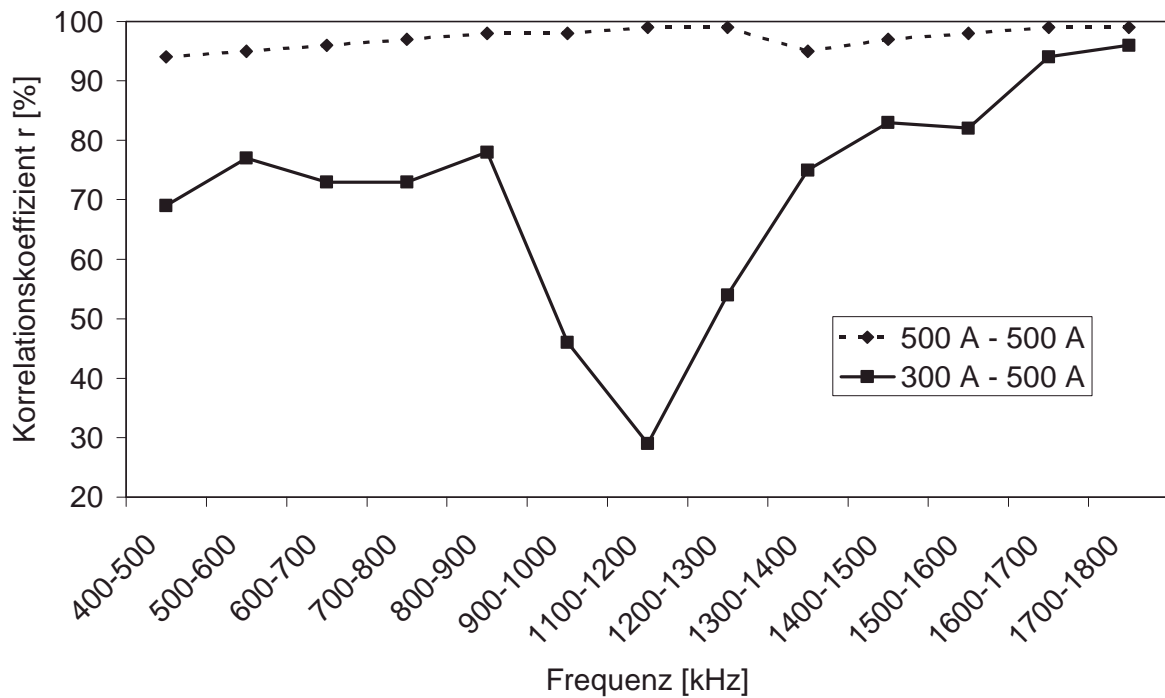


Abbildung 48: Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Bandbreite des Filtrés beträgt 100 kHz, Bauteil: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>

### 9.3.6 Untersuchung verschiedener Bauteilgeometrien

Im folgenden wurde überprüft, ob die in Kapitel 9.3.5 entwickelte Vorgehensweise zur Bestimmung bauteil- und werkstoffunabhängiger Frequenzspektren (siehe Tabelle 6, Fall A) bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien anwendbar ist. Zu diesem Zweck wurde als weiteres Bauteil ein Stahlblock aus St 37 mit den Abmessungen 25x160x160 mm<sup>3</sup> beschichtet. Die Beschichtungsparameter sowie der Versuchsaufbau sind identisch mit den bisher durchgeführten Versuchen, die genauen Angaben dazu befinden sich in Kapitel 9.1 (Ergänzende Informationen zur Versuchsdurchführung). Die Bauteildicke betrug jedoch nicht 50 mm, sondern 25 mm. Abbildung 49 zeigt die Frequenzspektren, die direkt am Bauteil während des Beschichtungspro-

zesses aufgenommen wurden (entsprechend Tabelle 6, S. 67, 2. Schritt, Fall A). Dabei sind zwei Spektren dargestellt, zum einen bei einer Bauteildicke von 50 mm und zum anderen bei einer Bauteildicke von 25 mm. Beide Spektren unterscheiden sich zunächst deutlich voneinander.

In einem weiteren Schritt die Eigenfrequenzen entsprechend der in Tabelle 6 (S. 67, Fall B) beschriebenen Vorgehensweise bestimmt. Die so entstehenden Eigenfrequenzspektren verdeutlichen die veränderte Bauteilgeometrie (Abbildung 50).

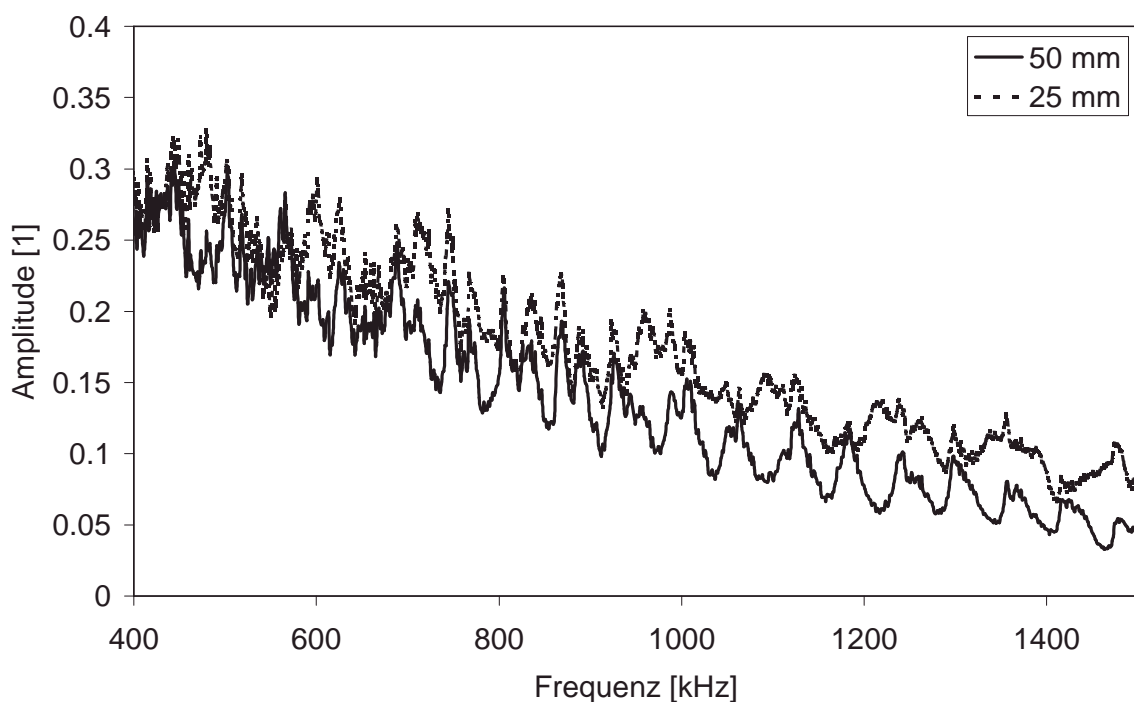


Abbildung 49: *Gemittelte Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Bauteildicken, APS, 500 A, Bauteile: Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup> und 25x160x160 mm<sup>3</sup>*

Die Abstände zwischen den Maxima des Eigenfrequenzverlaufs betragen bei einer Bauteildicke von 50 mm ca. 60 kHz und bei 25 mm ca. 120 kHz. Es kommt infolge der Halbierung der Bauteildicke zu einer Verdopplung des Abstandes zwischen den Maxima des Eigenfrequenzspektrums. Nach Gleichung 10 ist dieser Zusammenhang erwartungsgemäß.

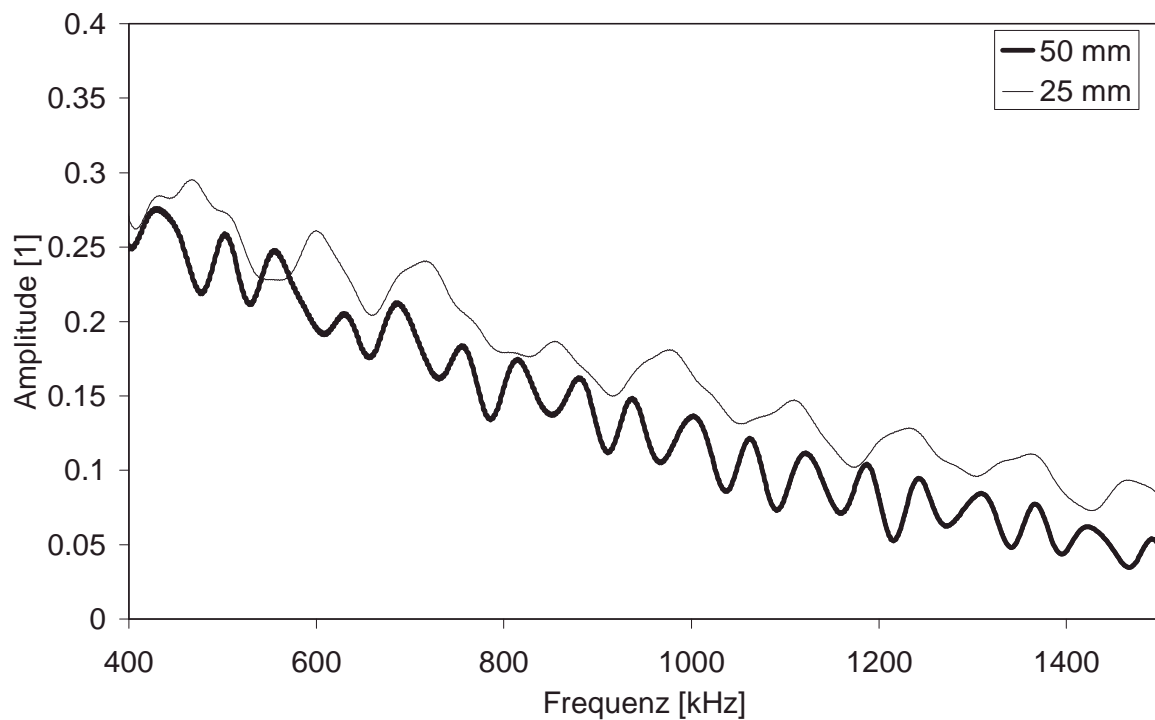


Abbildung 50: *Eigenfrequenzen (nach Tabelle 6, S. 67, Fall B), Bauteile: Stahlblock 25x160x160 mm<sup>3</sup> und 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

In einem nächsten Schritt wurden aus den beiden Spektren die Eigenfrequenzen eliminiert (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A). Das Ergebnis ist in Abbildung 51 dargestellt. Die Spektren, welche an zwei unterschiedlichen Bauteilgeometrien (Bauteildicke 50 mm und 25 mm) aufgenommen wurden, sind bis auf geringe Abweichungen identisch. Dies bestätigt auch die objektive Betrachtung der Ergebnisse mittels Korrelationskoeffizienten. Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Frequenzspektren (Abbildung 51) im Bereich zwischen 400 kHz und 1000 kHz beträgt 95 %. Damit weisen die SE-Signale hervorgerufen durch identische Prozeßzustände und gemessen auf verschiedenen Bauteilen ein hohes Maß an Ähnlichkeit auf.

Um zu vergleichen, wie sich die SE-Messung verschiedener Prozeßzustände auf verschiedenen Bauteilgeometrien verhält, wurde die folgende Vorgehensweise gewählt. Der Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup> erhielt bei 500 A und der Stahlblock 25x160x160 mm<sup>3</sup> bei 300 A Stromstärke eine Beschichtung. Aus den aufgenommenen Frequenzspektren wurden die Eigenfrequenzen eliminiert ((nach Tabelle 6, S. 67, Fall A) und der Korrelationskoeffizient berechnet; dieser liegt bei 66,9 %. Dies doku-

mentiert, daß sich auch bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien die Prozeßzustände anhand der SE-Spektren trennen lassen.

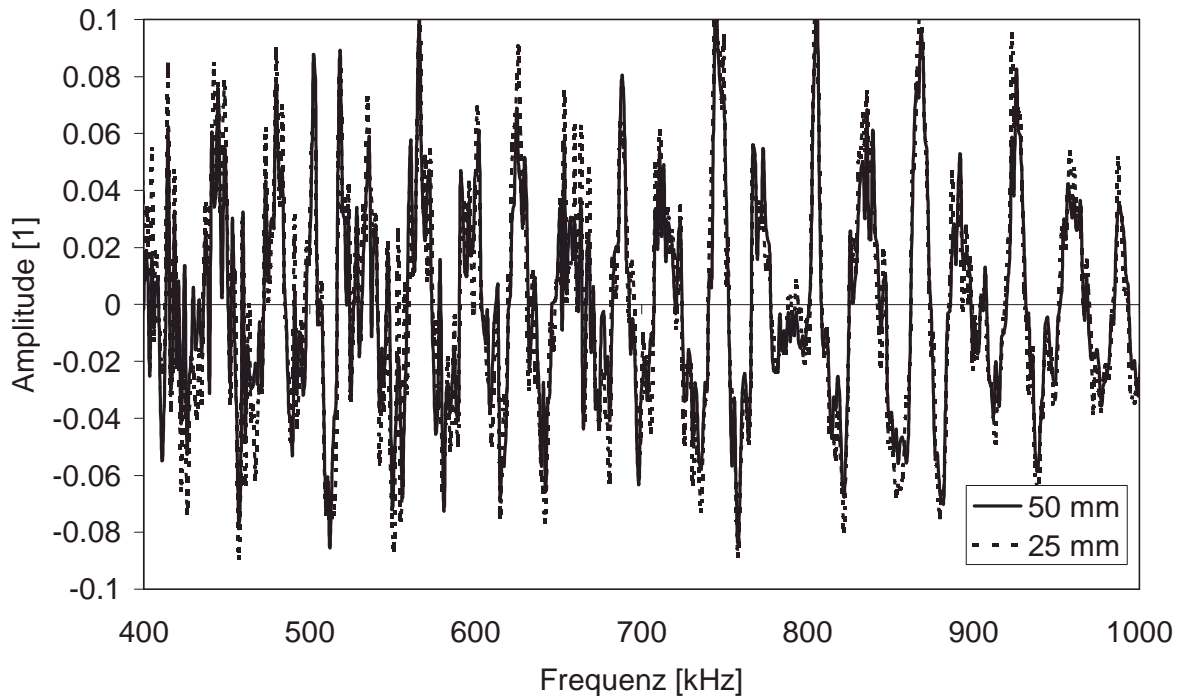


Abbildung 51: *Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Bauteilgeometrien, Eigenfrequenzen herausgefiltert (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A), APS, Bauteile: Stahlblock 25x160x160 mm<sup>3</sup> und 50x160x160 mm<sup>3</sup>*

Nachdem bisher an zwei Bauteilen die Unabhängigkeit der in Kapitel 9.3.5 (Bauteil- und werkstoffunabhängige Frequenzspektren) entwickelten Vorgehensweise von der Bauteilgeometrie belegt wurde, sollte ein weiteres Bauteil untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde ein Stahlblock (St 37) mit den Abmessungen 5x20x40 mm<sup>3</sup> eingesetzt. Die Bauteildicke beträgt folglich 5 mm. Die Versuchsdurchführung ist analog zu den bisher durchgeführten Untersuchungen. Abbildung 52 stellt den Verlauf der am Bauteil aufgenommenen Frequenzspektren dar. Dabei wird das Frequenzspektrum des Stahlblocks 5x20x40 mm<sup>3</sup> mit dem Spektrum des nun schon bekannten Stahlblocks 50x160x160 mm<sup>3</sup> verglichen, die Unterschiede zwischen beiden Frequenzverläufen sind offensichtlich. Abbildung 53 zeigt den Verlauf der Eigenfrequenzspektren (nach Tabelle 6, S. 67, Fall B); diese Verläufe unterscheiden sich ebenfalls stark.

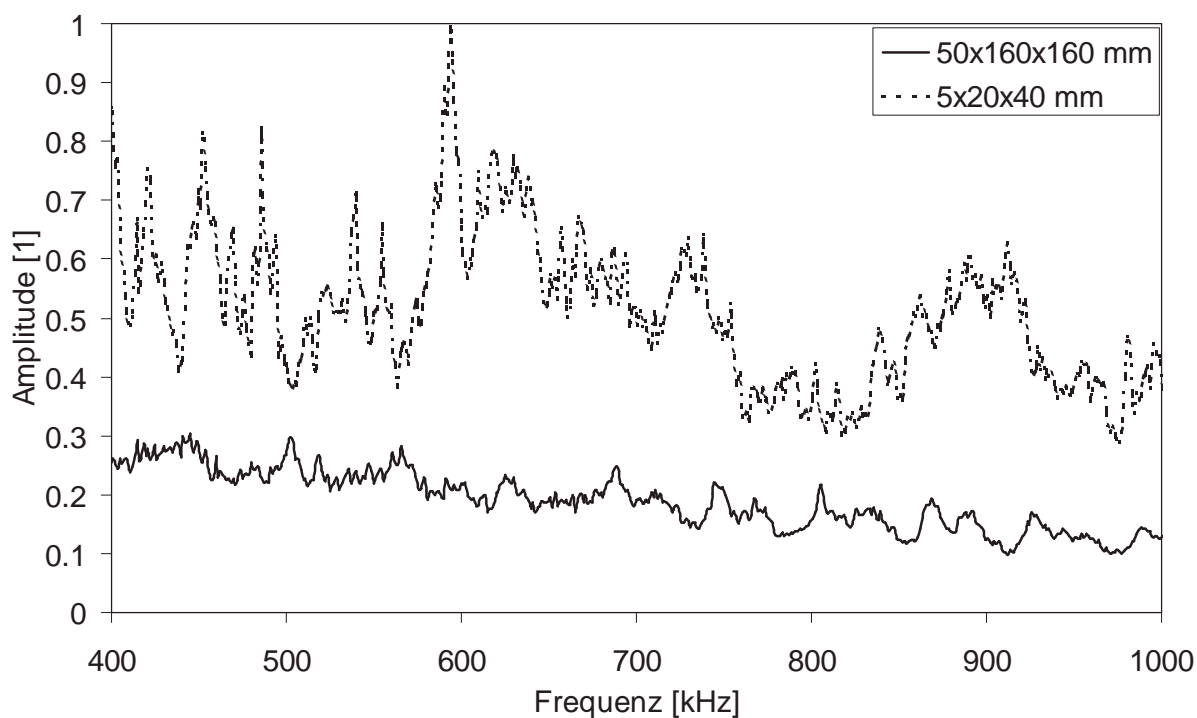


Abbildung 52: Gemittelte Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Bauteildicken, APS, 500 A, Bauteile: Stahlblock  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  und  $5 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$

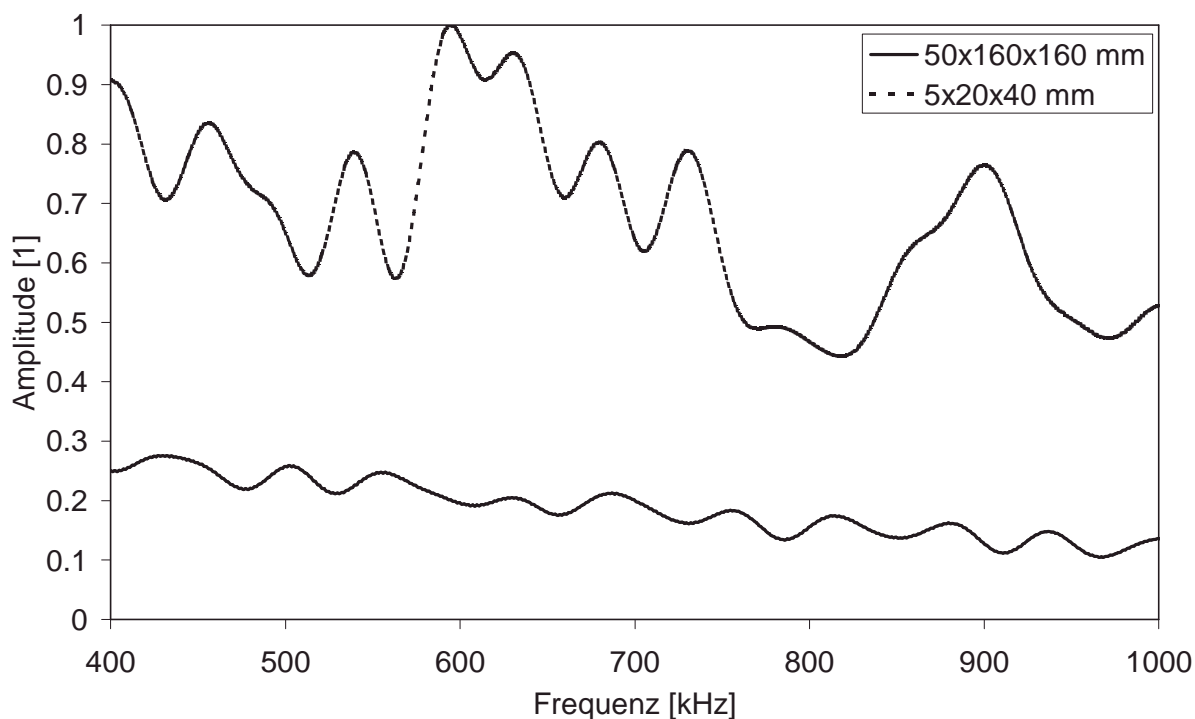


Abbildung 53: Eigenfrequenzen (nach Tabelle 6, S. 67, Fall B), Bauteile: Stahlblock  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  und  $5 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse der Spektren nach Eliminieren der Eigenfrequenzen (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A) dargestellt, auch diese Verläufe unterscheiden sich deutlich, diesen zunächst subjektiven Eindruck bestätigt der Korrelationskoeffizient, der bei 5 % liegt. Bei den hier vorliegenden Bauteilgeometrien ist eine bauteilunabhängige Bewertung der Frequenzspektren nicht möglich. Damit scheint zunächst zwischen zu den in Abbildung 51 und Abbildung 54 dargestellten Ergebnissen ein Widerspruch zu bestehen.

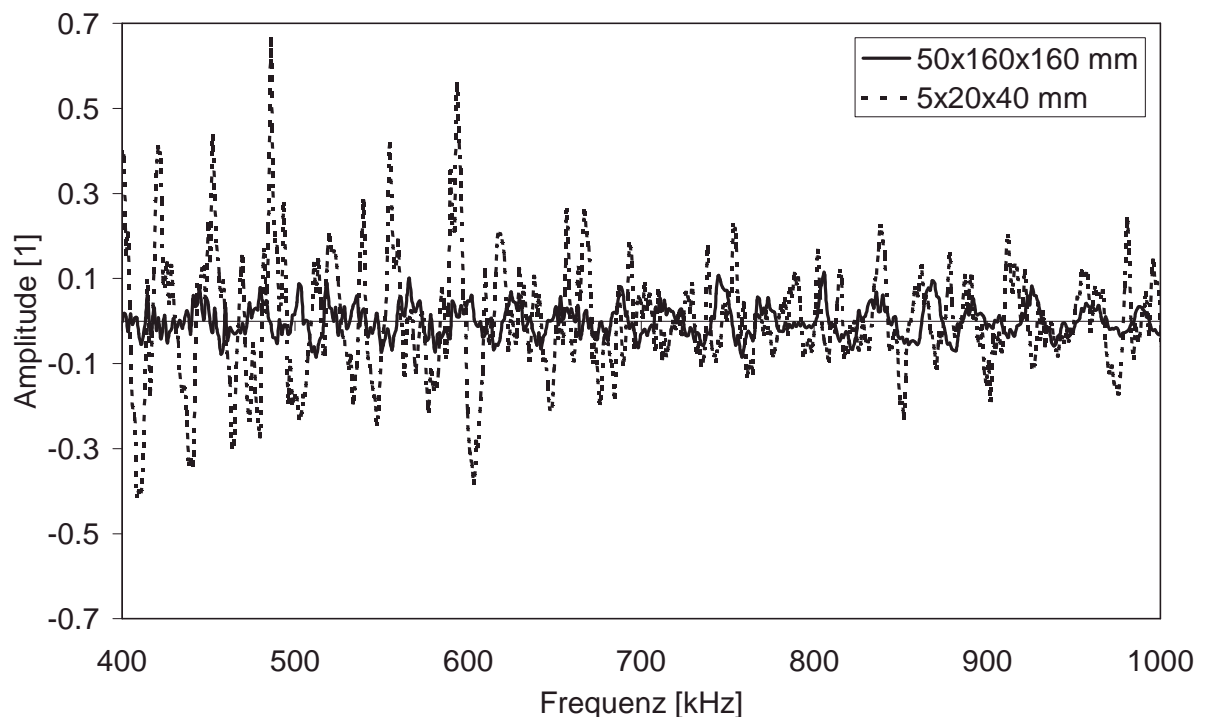


Abbildung 54: Frequenzspektren während einer Überfahrt bei verschiedenen Bauteilgeometrien, Eigenfrequenzen herausgefiltert (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A), APS, Bauteile: Stahlblock  $5 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$  und  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$

Zur Klärung dieses Verhaltens soll die Wellenlänge der vorliegenden SE-Signale betrachtet werden.

Gleichung 12 
$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$\lambda$  := Wellenlänge  
 $c$  := Schallgeschwindigkeit  
 $f$  := Frequenz

Nach Gleichung 12 liegen also im betrachteten Bereich zwischen 400 kHz und 1 MHz Wellenlängen von ca. 5,9 mm bis 15 mm vor. Bei den Stahlblöcken mit den Geometrien  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  und  $25 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  sind die Bauteilabmessungen deutlich größer oder ungefähr gleich der Wellenlänge. Damit ist eine freie Ausbreitung der SE-Signale im Bauteil gewährleistet.

Sobald die Bauteilabmessungen kleiner als die Wellenlänge der SE-Signale werden, ist die freie Ausbreitung der Schallwellen im Bauteil nicht möglich. Es entstehen geführte Wellen, sogenannte Plattenwellen. Plattenwellendiagramm in Abbildung 55 stellt den komplexen Zusammenhang zwischen Plattendicke, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit dar.

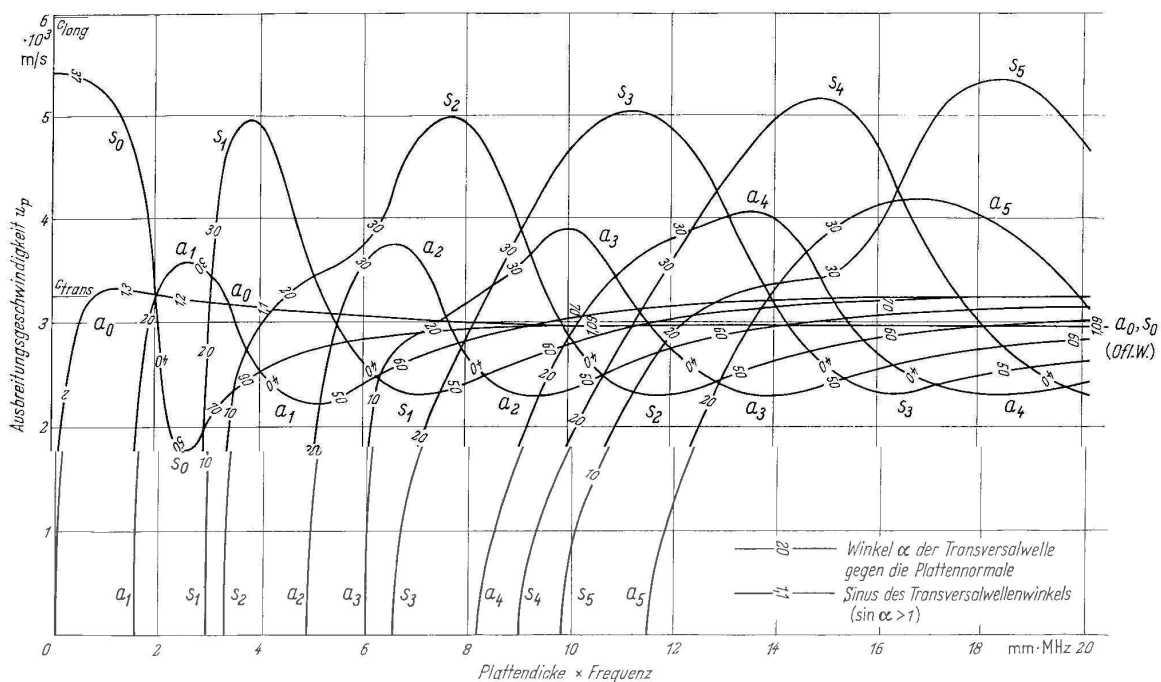


Abbildung 55: Plattenwellendiagramm für Stahl,  $c_{\text{long}} = 5960 \text{ m/s}$ ,  $c_{\text{trans}} = 3260 \text{ m/s}$  /81/

Eine analytische Bestimmung der in Platten vorliegenden Wellenformen ist äußerst komplex /82/. Aus diesem Grund lassen sich SE-Wellenformanalysen erfolgreich nur an Geometrien durchführen, welche größer als die Wellenlänge sind.

Genau dieser Fall liegt beim untersuchten Stahlblock mit den Abmessungen  $5 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$  vor. Die Wellenlänge ist größer als die Bauteildicke, es entstehen völlig andere Wellenmoden, die sich auch nach dem Herausfiltern der Eigenfrequenzen

(nach Tabelle 6, S. 67, Fall A) nicht mit den SE-Signalen in Bauteilen mit Abmessungen, welche größer als die Wellenlänge sind, vergleichen lassen. Das im Kapitel 9.3.5 (Bauteil- und werkstoffunabhängige Frequenzspektren) dargestellte Verfahren eignet sich also ausschließlich für Bauteile, deren Abmessungen größer als die Wellenlänge sind.

Eine weitere Frage muß jedoch noch geklärt werden. Ist an Bauteilen, deren Abmessungen kleiner als die Wellenlänge sind, eine Unterscheidung der Prozeßgrößen auf der Grundlage des entstehenden Körperschalls möglich? Dazu wurde während der Beschichtung des Stahlblocks  $5 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$  die Stromstärke variiert. Abbildung 56 stellt die Frequenzspektren nach der Herausfilterung der Eigenfrequenzen (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A) von verschiedenen Beschichtungsvorgängen bei unveränderter Stromstärke dar. Die Spektren sind sich sehr ähnlich, der Korrelationskoeffizient beträgt 98 %. Eine Verminderung der Stromstärke auf 300 A führt im Vergleich zu den bei 500 A ermittelten Spektren zu einem Korrelationskoeffizienten von 71 %. Daraus folgt, daß obwohl die Bauteilgeometrie ungünstig ist, der Zusammenhang zwischen dem Prozeßzustand und den entstehenden SE-Signalen nachgewiesen werden kann. Damit ist also auch an solchen Bauteilen eine Überwachung des Beschichtungsprozesses möglich.



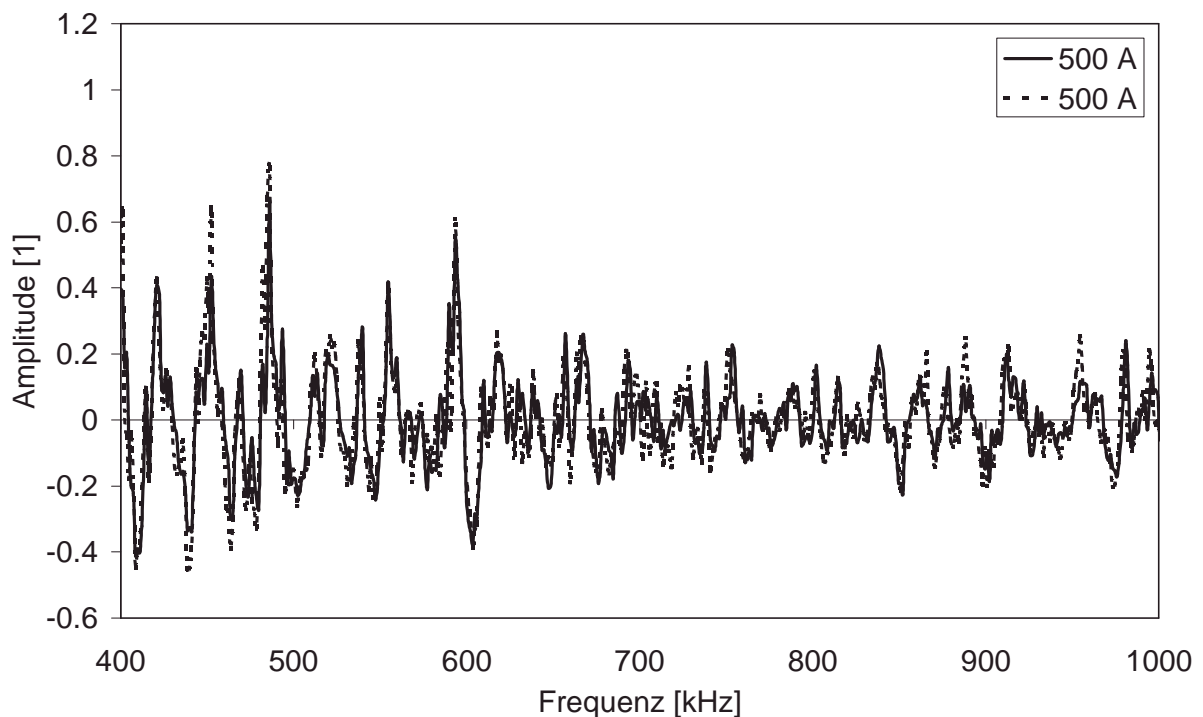


Abbildung 56: Frequenzspektren während einer Überfahrt, Eigenfrequenzen herausgefiltert (nach Tabelle 6, S. 67, Fall A), APS, Stahlblock  $5 \times 40 \times 20 \text{ mm}^3$ , 500 A

### 9.3.7 Einfluß der Position der Spritzpistole

Die bisherigen Untersuchungen bei der SE-Messung am Bauteil bezogen sich auf eine konstante Position der Spritzpistole. In dem Moment, wenn die Spritzpistole direkt über dem Sensor steht, findet die Signalaufnahme statt. Im folgenden sollte geklärt werden, wie groß der Einfluß der Spritzpistole auf die Aufnahme und Auswertung der Frequenzspektren ist.

Dazu wurden die während einer Überfahrt über das zu beschichtende Bauteil entstehenden Frequenzspektren miteinander verglichen. Als Bauteil wurde der Stahlblock  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  eingesetzt; die dieser Auswertung zugrundeliegenden Spektren sind schon in Abbildung 37 (S. 60) dargestellt. Zum Vergleich der Frequenzspektren untereinander wurde der Korrelationskoeffizient zum Frequenzspektrum gebildet, das aufgenommen wurde, wenn die Spritzpistole direkt über dem Sensor steht.

Abbildung 57 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung. Dargestellt ist der Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit von der Überfahrzeit. Sobald Partikel auf das Bauteil treffen, entstehenden Frequenzspektren, welche sich sehr ähnlich sind. Der Wert des Korrelationskoeffizienten liegt dann über 95 %. Damit kann festgestellt werden, daß der Einfluß der Position der Spritzpistole in Relation zum SE-Sensor weit geringer ist als der Einfluß des Prozeßzustandes.

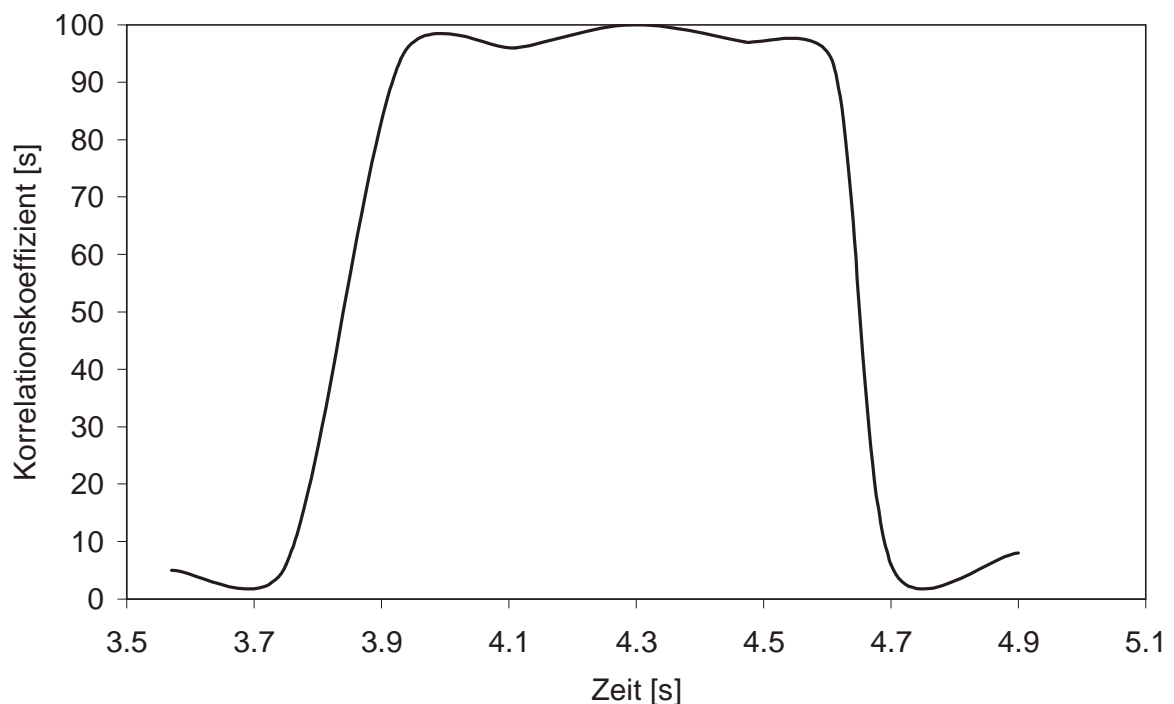


Abbildung 57: *Korrelationskoeffizient in Abhängigkeit von der Überfahrzeit, APS, Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup>, 500 A*

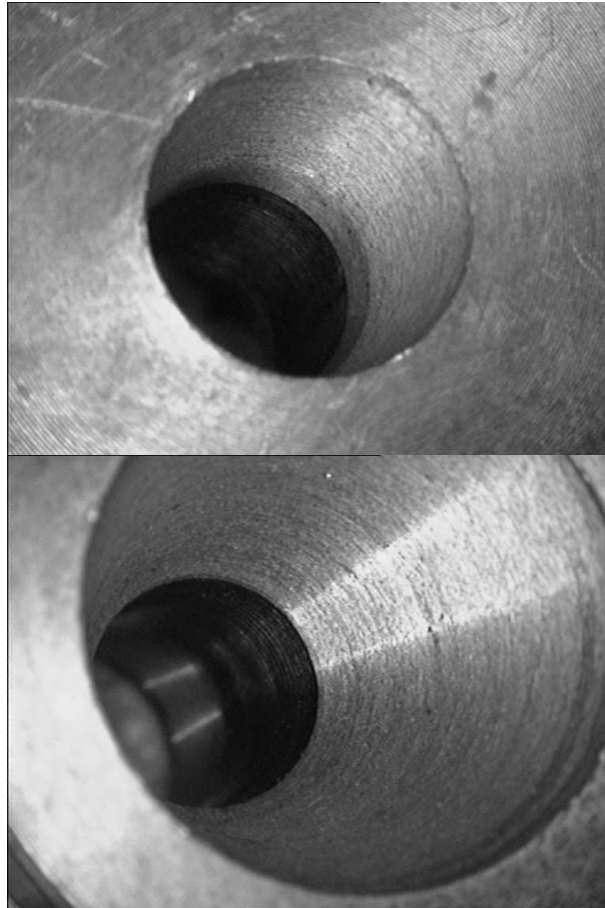
#### 9.4 Einfluß der nicht on-line regelbaren Prozeßparameter

Durch die Veränderung der On-line-Prozeßparameter wurden – in einem bestimmten Rahmen - verschiedenen Prozeßbedingungen gezielt und reproduzierbar eingestellt. Dies ist bei der Entwicklung bzw. Anpassung eines Prüfverfahrens eine gängige und sinnvolle Vorgehensweise. Ab einem gewissen Zeitpunkt muß ein Prüfverfahren jedoch seine Eignung bei den praxisnahen Prozeßabweichungen unter Beweis stellen. Beim thermischen Spritzen sind dies die nicht on-line regelbaren Prozeßparameter, zu diesen zählen in erster Linie der Düsenzustand sowie die Pulvereinschußbedingungen (vgl. Kapitel 4.2).

Aus diesem Grund wurden gezielt praxisnahe Fehler in den Spritzprozeß eingebracht, um die nicht on-line regelbaren Prozeßparameter zu simulieren. Zur Simulation des Düsenverschleißes wurden zum einen verschlissene Düsen und zum anderen eine Düse mit zu großem Durchmesser eingesetzt (8 mm statt 6 mm). Abbildung 58 zeigt die Seitenansicht der beim APS eingesetzten Spritzdüse. Links befindet sich die Austrittsöffnung des Plasmas; im rechten Teil sind die Kühlrippen und der schwarze Dichtring zu erkennen. In Abbildung 59 sind zum einen die Gasaustritts- und zum anderen die Eintrittsöffnung der Spritzdüse zu erkennen.



Abbildung 58: Spritzdüse, Gesamtlänge 33 mm



*Abbildung 59: Öffnung einer nicht verschlissenen Düse  
**oben:** Ansicht von vorne (Austritt der Gasströmung),  $\varnothing$  6 mm  
**unten:** Ansicht von hinten,  $\varnothing$  13 mm*

Abbildung 59 und Abbildung 60 verdeutlichen die Verschleißspuren an den Düsen, welche zur Simulation des Düsenverschleißes verwendet wurden. Insbesondere im Austrittsbereich sind deutliche Verschleißspuren zu erkennen. Dadurch wird zum einen die Oberfläche aufgeraut und zum anderen der anfangs runde Düsenquerschnitt verändert.



Abbildung 60: Öffnung einer verschlissenen Düse (Düsenverschleiß 1)  
**oben:** Ansicht von vorne (Austritt der Gasströmung),  $\varnothing$  6 mm  
**unten:** Ansicht von hinten,  $\varnothing$  13 mm

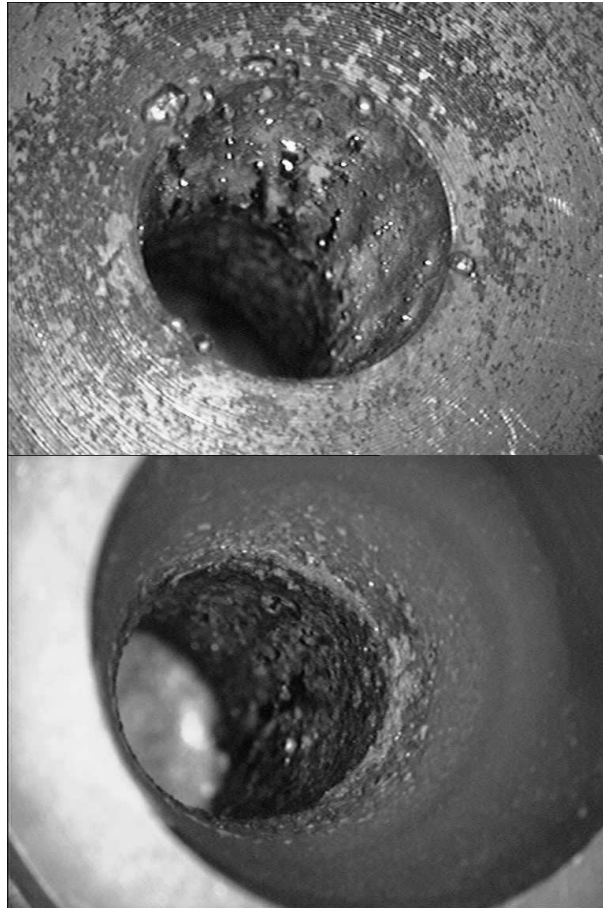


Abbildung 61: *Öffnung einer verschlissenen Düse (Düsenverschleiß 2)*  
**oben:** Ansicht von vorne (Austritt der Gasströmung),  $\varnothing$  6 mm  
**unten:** Ansicht von hinten,  $\varnothing$  13 mm

Düsenverschleiß entsteht infolge der Erosion des Lichtbogenansatzpunktes. Häufiges Zünden des Lichtbogens verursacht Vorzugsbrennpunkte, an denen sich der Lichtbogen festsetzt und dann nicht mehr, wie vorgesehen, rotiert. Es kommt zum einseitigen oder punktuellen Auswaschen der Düse.

Die Pulvereinschußbedingungen wurden über das Einschußröhrchen geändert. Üblicherweise steht das Einschußröhrchen beim APS mit Chromoxid senkrecht zum Spritzstrahl (Röhrchen 2 in Abbildung 62). Zur Simulation fehlerhafter Einschußbedingungen kommen 2 Einschußröhrchen einerseits mit einem Winkel von  $10^\circ$  Grad zur Spritzpistole hin (Röhrchen 5 in Abbildung 62) und andererseits mit einem Winkel von  $30^\circ$  Grad weg von der Spritzpistole (Röhrchen 1 in Abbildung 62) zum Einsatz. Der Winkel des Einschußröhrchens zum Spritzstrahl ist durch dessen Bauweise unveränderbar vorgegeben, Justierarbeiten hinsichtlich des Winkels sind beim Einbau

nicht erforderlich. In der Praxis hängen die Pulvereinschußbedingungen nicht nur vom Winkel des Pulverröhrchens, sondern auch von seinem Verschleißzustand ab.

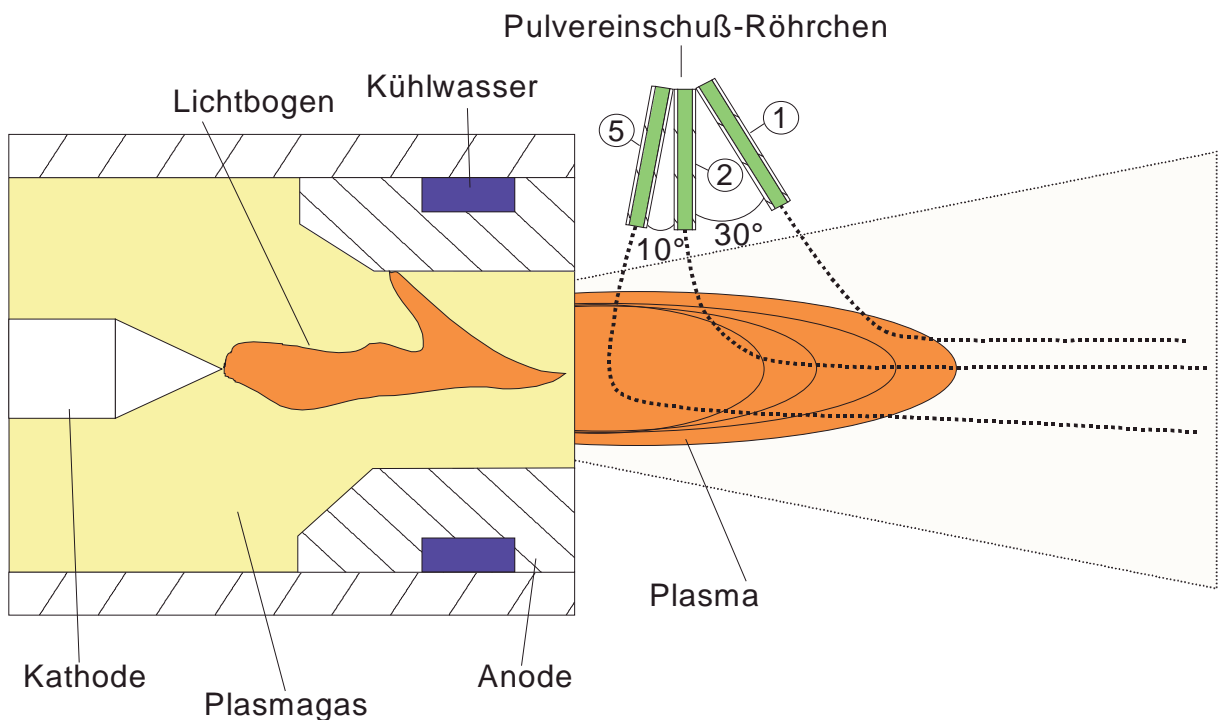


Abbildung 62: Veränderung des Pulvereinschuß-Röhrchens beim APS

Durch den veränderten Einschuss der Partikel in den Spritzstrahl kommt es zu unterschiedlichen Flugbahnen, auf welchen sich die Partikel im Plasma bewegen. Bei einer veränderten Injektion des Partikels in den Strahl fällt das Partikel entweder durch den Strahl hindurch oder es dringt nicht vollständig in ihn ein. Beides führt zu einer mangelhaften Aufschmelzung der Partikel und somit zu einer schlechten Schichtgüte.

#### 9.4.1 Wirkung der Musterfehler auf die Schichtenstehung

Um die Wirkung der Musterfehler auf die Schichtenstehung zu beschreiben, wurden Querschliffe der Schichten hergestellt sowie die Härte  $HV_{0,1}$ , die Porosität und die Schichtdicke bestimmt. Die Schichtdicke der Proben war unterschiedlich, da jeweils vier Überfahrten mit der Spritzpistole über die zu beschichtenden Proben gemacht wurden. Das bedeutet, daß sich abhängig von den Musterfehlern eine unterschiedliche Auftragsrate einstellt. Die Ergebnisse der metallografischen Untersuchungen sind in Tabelle 7 zusammengefaßt.

|                             | Härte HV <sub>0,1</sub> | Porosität [%] | Schichtdicke [µm] |
|-----------------------------|-------------------------|---------------|-------------------|
| Referenz-Prozeß („Optimal“) | 1200                    | 3             | 190               |
| Düsenverschleiß 1           | 1000                    | 6             | 100               |
| Düsenverschleiß 2           | 1000                    | 7             | 90                |
| Düsenverschleiß 3           | 950                     | 8             | 150               |
| Düse 8 mm                   | 950                     | 8             | 180               |
| Rohr 1                      | -                       | -             | 10                |
| Rohr 5                      | 1250                    | 4             | 230               |

Tabella 7: *Einfluß nicht on-line regelbarer Prozeßparameter auf die Schichteigenschaften*

Die Beschichtung mit optimalen Prozeßparametern führte zu einer Schicht mit 1200 HV<sub>0,1</sub>, 3 % Porosität und einer Schichtdicke von 190 µm (Abbildung 63). Die Musterfehler zum Düsenverschleiß (Abbildung 63, Abbildung 64, Abbildung 65) führten durchgehend zu Schichten mit geringerer Härte, geringerer Auftragsrate und höherer Porosität.

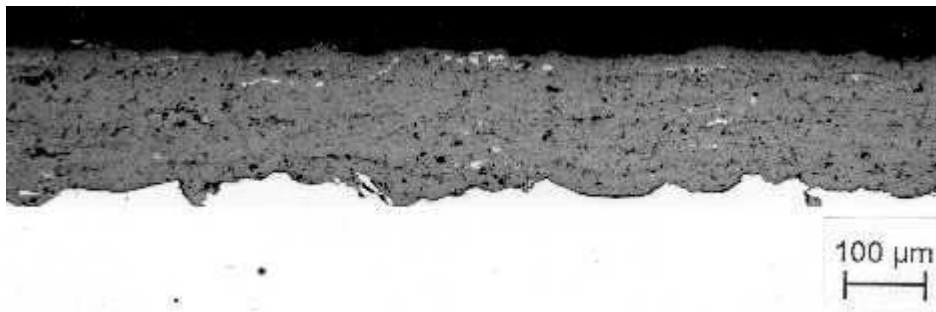


Abbildung 63: *Mikroskopische Aufnahme (Querschliff) einer Chromoxidschicht, optimale Beschichtungsparameter, APS (I=500 A), 1200 HV<sub>0,1</sub>, 3 % Porosität*



Abbildung 64: *Mikroskopische Aufnahme (Querschliff) einer Chromoxidschicht, Düsenverschleiß 1, APS (I=500 A), 1000 HV<sub>0,1</sub>, 6 % Porosität*



Die Beschichtung mit dem Pulvereinschußrohr 1, welches in einem Winkel von 30 Grad weg von der Spritzdüse gerichtet war, ergibt fast keinen Schichtauftrag. Folglich waren metallografische Untersuchungen nicht möglich. Dieses Rohr ist zur Beschichtung ungeeignet; im Versuch werden so jedoch verschlechterte Pulvereinschußbedingungen simuliert, z.B. infolge von Verschleiß an der Spitze des Pulverröhrchens.

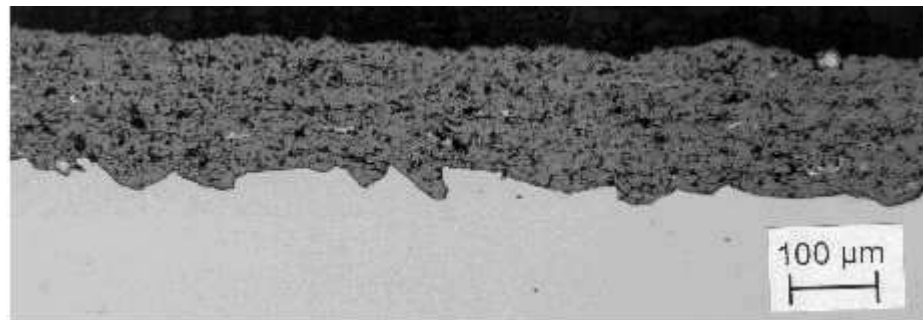


Abbildung 65: Mikroskopische Aufnahme (Querschliff) einer Chromoxidschicht, Düse 8 mm, APS ( $I=500\text{ A}$ ),  $950\text{ HV}_{0,1}$ , 8 % Porosität

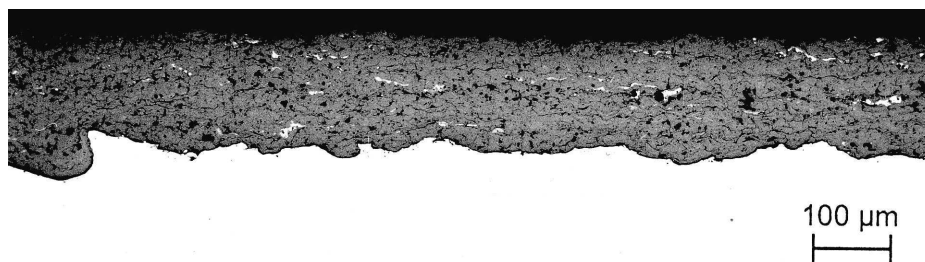


Abbildung 66: Mikroskopische Aufnahme einer Chromoxidschicht (Querschliff), Düsenverschleiß 3, APS ( $I=500\text{ A}$ ),  $950\text{ HV}_{0,1}$ , 8 % Porosität

Rohr 5, welches in Winkel von 10 Grad zur Spritzdüse hin gerichtet ist, ergibt unerwartet gute Schichteigenschaften. Der Schichtauftrag und die Härte sind größer als unter „optimalen“ Bedingungen. Offensichtlich führt die Ausrichtung des Pulverröhrchens hin zur Spritzdüse zu einer sehr langen Verweilzeit der Partikel im Plasma und so zu einer besseren Aufschmelzung der Spritzpartikel.

#### 9.4.2 Auswertung der Frequenzspektren

Die Nachweisbarkeit der in Kapitel 9.4.1 beschriebenen Musterfehler mittels SEA sollte im folgenden untersucht werden. Zu diesem Zweck wurde der bewährte Versuchsaufbau (siehe auch Abbildung 8, S. 31) bestehend aus dem Stahlblock St 37

und den Abmessungen  $50 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  und der Sensor Panametrics 1 MHz verwendet. Die Beschichtungsversuche wurden mit einem erfahrungsgemäß guten Parametersatz (500 A, 30 V, 120 mm, 0,2 m/s) durchgeführt. Die Schallemissions(SE)-Signale wurden weiterhin mit einer Abtastfrequenz von 5,12 MHz aufgenommen. Zur Auswertung der SE-Signale wurde die in Kapitel 9.3.5 (Bauteil- und werkstoffunabhängige Frequenzspektren) entwickelte Methodik eingesetzt:

- ◆ Aufnahme der Zeitsignale
- ◆ Bestimmung der Frequenzspektren
- ◆ Elemieren der Bauteileigenfrequenzen aus dem Frequenzspektrum
- ◆ Bildung des Korrelationskoeffizienten

Dabei wurden die Korrelationskoeffizienten zunächst im Vergleich zu den optimalen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) Prozeßbedingungen gebildet. Es steht die Frage im Vordergrund, ob sich „gute“ Prozeßbedingungen von „schlechten“ Bedingungen auf Basis der SE-Spektren voneinander unterscheiden lassen.

Die sich so ergebenden Korrelationskoeffizienten sind in Abbildung 67 dargestellt. Der Balken für optimale (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) Schichten liegt bei 100 %, dieser Wert ist nur folgerichtig, da das Signal mit sich selbst verglichen wird. Die Werte für den Düsenverschleiß liegen zwischen 55 % und 61 %, sie sind demnach deutlich von optimalen Prozeßbedingungen unterscheidbar. Auch der Korrelationskoeffizient für die 8 mm-Düse liegt mit 61,5 % in diesem Bereich. Am geringsten ist der Wert für das Pulverröhrchen 1 mit 21,2 %, hier besteht folglich die geringste Ähnlichkeit mit den Spektren der optimalen Prozeßbedingungen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88). Die entstehenden Schichten bestätigen diese Aussage. Pulverrohr 5 erreicht mit 86,7 % die höchste Übereinstimmung mit den optimalen Bedingungen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88).

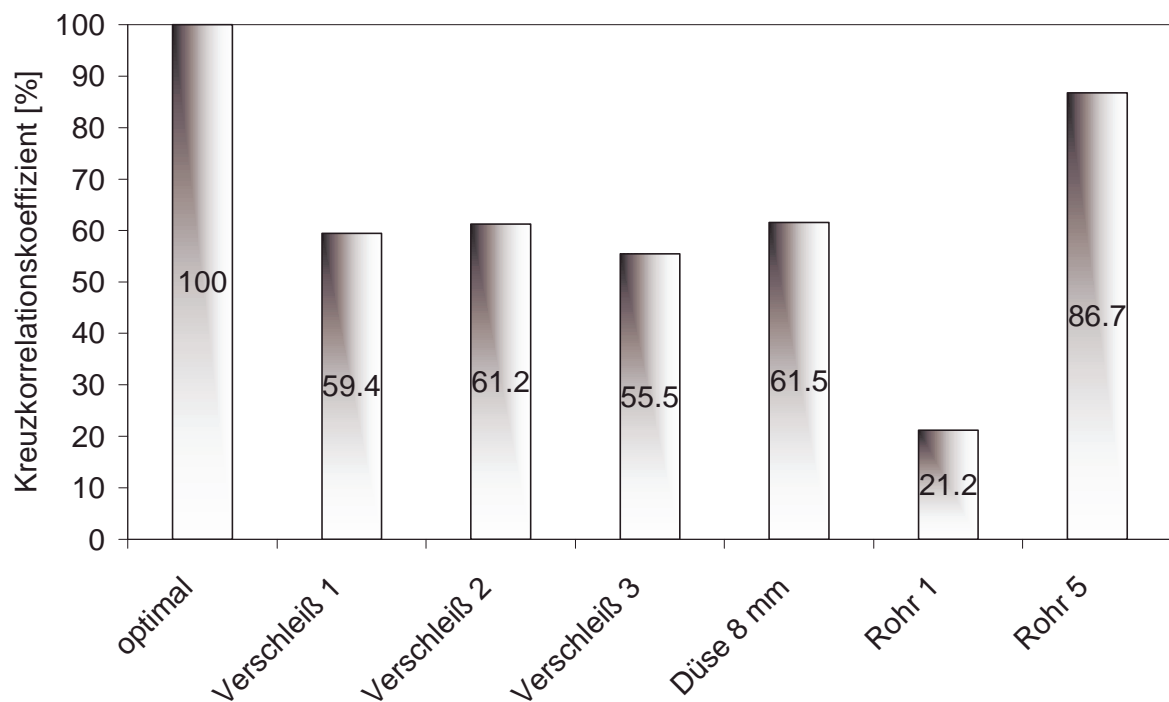


Abbildung 67: Korrelationskoeffizienten der SE-Spektren im Vergleich zu optimalen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) Prozeßbedingungen

Die Versuche belegen, daß sich die Spektren aller Musterfehler eindeutig von dem optimalen Prozeßspektrum (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) unterscheiden. Bis zu diesem Punkt kann also festgestellt werden, daß eine Gut-Schlecht-Aussage auf Basis der SE-Spektren möglich ist. Sollten sich bei einer langfristigen Prozeßbetrachtung bessere Prozeßparameter gefunden werden (z.B. Rohr 5), so ist eine Neudefinition des „optimalen“ Prozesses erforderlich.

Darüber hinaus ist die Klassifizierung von Prozeßfehlern von Interesse. Es stellt sich die Frage, ob es grundsätzlich denkbar ist, auf der Basis der SE-Spektren bestimmte Prozeßfehler zu klassifizieren. Aus diesem Grund wurde im folgenden die Fehlerart Düsenverschleiß näher betrachtet. Anhand des Korrelationskoeffizienten sollte bewertet werden, wie groß die Übereinstimmung der bei dieser Fehlerart entstehenden SE-Spektren ist. Dazu wurden die SE-Spektren vom Düsenverschleiß 1, Düsenverschleiß 2, Düsenverschleiß 3 und der 8 mm-Düse betrachtet. Die SE-Spektren von Düsenverschleiß 1 wurden mit den anderen SE-Spektren verglichen, d.h. es wurde jeweils der Korrelationskoeffizient mit dem Spektrum von Düsenverschleiß 1 gebildet (Abbildung 68).

Es stellt sich eine relativ hohe Übereinstimmung der Korrelationskoeffizienten beim Düsenverschleiß 1, Düsenverschleiß 2 und Düsenverschleiß 3 heraus. Diese Werte liegen bei ca. 90%. Der Korrelationskoeffizient von der 8 mm-Düse liegt bei ca. 80 %; dies bedeutet eine gewisse Ähnlichkeit, aber die Spektren unterscheiden sich signifikant voneinander. Eine verschlissene Düse verhält sich anders als eine, welche im Durchmesser 2 mm zu groß gewählt worden ist. Die metallografischen Untersuchungen bestätigen diese Aussage.

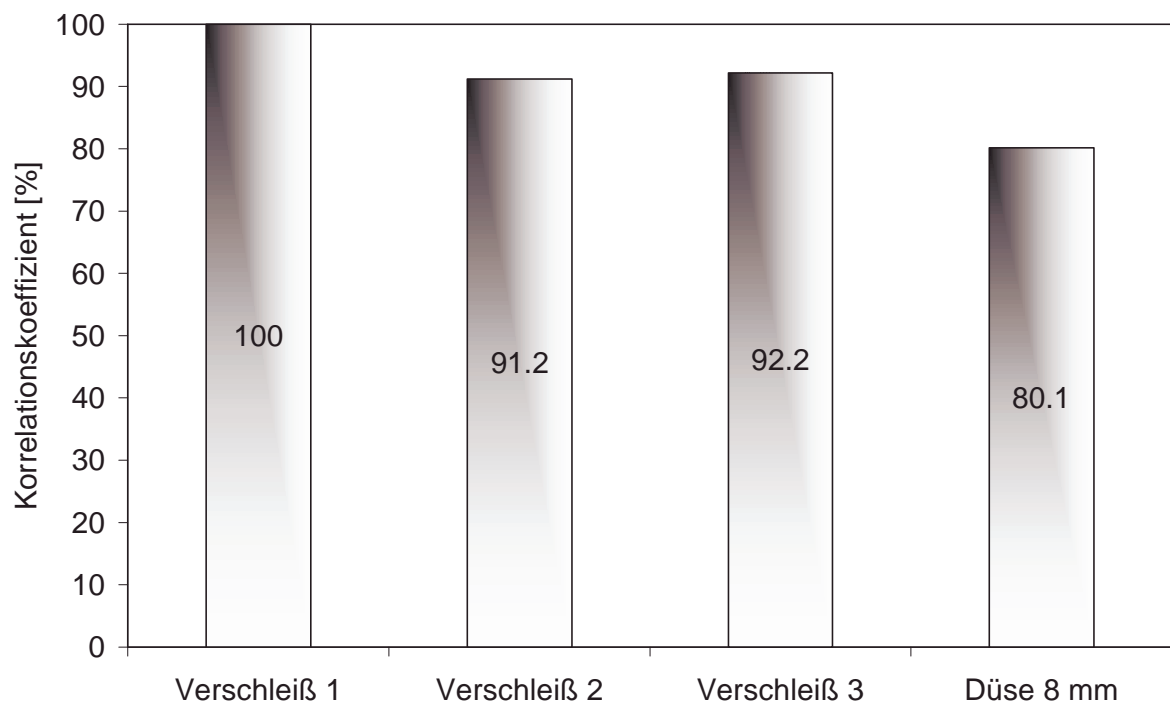


Abbildung 68: Korrelationskoeffizienten der SE-Spektren beim Musterfehler Düsenverschleiß

### 9.5 Einsatz von Neuronalen Netzes zur Bewertung von SE-Spektren

Im folgenden soll untersucht werden, ob sich Neuronale Netze zur Auswertung der SE-Spektren eignen.

Als Neuronales Netz wurde ein Kohonen-Netz ausgewählt, da dieser Netztyp große Datenmengen verarbeiten kann sich durch unüberwachtes Lernen auszeichnet. Unüberwachtes Lernen heißt, in der Trainingsphase sucht das Kohonen-Netz Strukturen in den vorgegebenen Daten und richtet dementsprechend Klassen ein. Es wird also durch das Neuronale Netz eine Mustererkennung vorgenommen. Ist das Netz einmal

trainiert, werden neue Daten sehr schnell den gebildeten Klassen zugeordnet /83,84/.

Die SE-Spektren dienen als Eingabevektoren für das Neuronale Netz. Das Kohonen-Netz besteht aus einem Feld von Gewichtsvektoren, deren Komponenten anfangs mit Zufallszahlen besetzt sind. Die Größe (Komponenten-Anzahl) der Gewichtsvektoren entspricht der Größe der Eingabevektoren. Die Anzahl der Gewichtsvektoren ist ungefähr dreimal so hoch wie die der Eingabevektoren, Abbildung 69. Bei dieser Angabe handelt es sich um einen Erfahrungswert, um optimale Trainingsergebnisse zu erreichen.

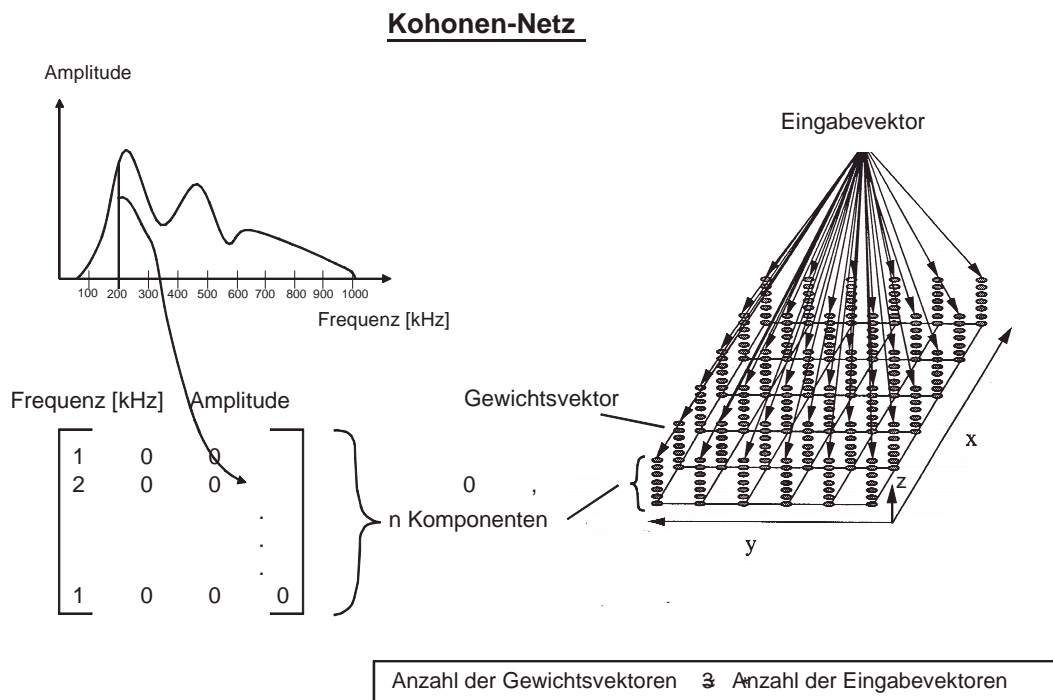


Abbildung 69: Prinzip des Kohonen-Netzes /84/

Jeder Eingabevektor wird mit jedem Gewichtsvektor verknüpft, dabei wird das Skalarprodukt dieser beiden normierten Vektoren berechnet. Für jeden Eingabevektor wird der Gewichtsvektor ermittelt, welcher diesem am ähnlichsten ist (Skalarprodukt = 1). Dieser Gewichtsvektor wird zum „Gewinner“ erklärt und mitsamt seiner Umgebung dem Eingabevektor angepaßt. Dabei wird dessen Gewichtsvektor fast vollständig durch den Eingabevektor überschrieben. Je weiter man sich auf der Kohonen-Karte von dem „Gewinner“ entfernt, um so weniger wird der Gewichtsvektor der Einheit dem Eingabevektor „ähnlicher“ gemacht /84/. Mathematisch läßt sich dies durch Gleichung 10 ausdrücken.

Gleichung 13 
$$\vec{w}(t+1) = \vec{w}(t) + \alpha(t, x, y) \cdot (\vec{x}(t) - \vec{w}(t)) \quad /84/$$

$\vec{w}$  := Gewichtsvektor  
 $\vec{x}$  := Eingabevektor  
 $\alpha$  := Adaptionsfaktor  
 $t$  := Zeit  
 $x, y$  : Ortskoordinaten

Dieser Vorgang wird für jeden Eingabevektor ca. 10 mal durchlaufen und führt zu folgendem Ergebnis. Sind in der vorgegeben Menge der Eingabevektoren Gruppen ähnlicher Vektoren enthalten, so wird der Algorithmus diese Struktur erkennen und folglich das Kohonen-Netz dementsprechend trainieren. Es erfolgt in dieser Trainingsphase eine Mustererkennung, ohne daß weitere Informationen von außen zugeführt werden müssen. Aus diesem Grund spricht man in diesem Fall von unüberwachtem Lernen. Ist das Netz einmal trainiert, so können innerhalb kürzester Zeit Eingabevektoren aus dem laufenden Prozeß bewertet werden.

Das Kohonen-Netz strukturiert die Frequenzspektren entsprechend ihrer Ähnlichkeit. Dadurch bilden sich Gruppen von Signalen, die sich innerhalb der Gruppe nur wenig unterscheiden. Sie kennzeichnen und repräsentieren ganz bestimmte Signal- und folglich auch Prozeßmerkmale.

Die Neuronale Netztechnik wurde zunächst zum Nachweis des Einflusses von On-line-Prozeßparametern auf die Entstehung der SE-Spektren und anschließend zum Nachweis der nicht on-line regelbaren Parameter eingesetzt.

### 9.5.1 Nachweis von On-line-Prozeßparametern

Als On-line-Prozeßparameter wurde wie in den vorherigen Untersuchungen die Stromstärke ausgewählt. Die Stromstärke wurde in 3 Schritten variiert. Es wurden Messungen bei 300 A, 400 A und 500 A durchgeführt. Dabei kam wiederum als Bauteil der Stahlblock 50x160x160 mm<sup>3</sup> zum Einsatz. Die dem Kohonen-Netz zugeführten Daten stammen von dem Versuchsaufbau, welcher bereits in den Kapiteln 9.1 und 9.3.2 ausführlich beschrieben worden ist (siehe auch Abbildung 8, S. 31).

Dem Kohonen-Netz wurden als Eingangsvektoren Frequenzspektren (Eigenfrequenzen nicht eliminiert) zwischen 400 kHz und 1 MHz zugeführt. Jedes Frequenzspektrum besteht aus 960 Punkten, damit besitzt jeder Eingangs- und Ge-

wichtsvektor ebenfalls 960 Komponenten. Bei jeder der 3 Stromstärken wurden 250 Frequenzspektren aufgenommen. Die Datenbasis zum Training des Netzes bestand folglich aus 750 Eingangsvektoren.

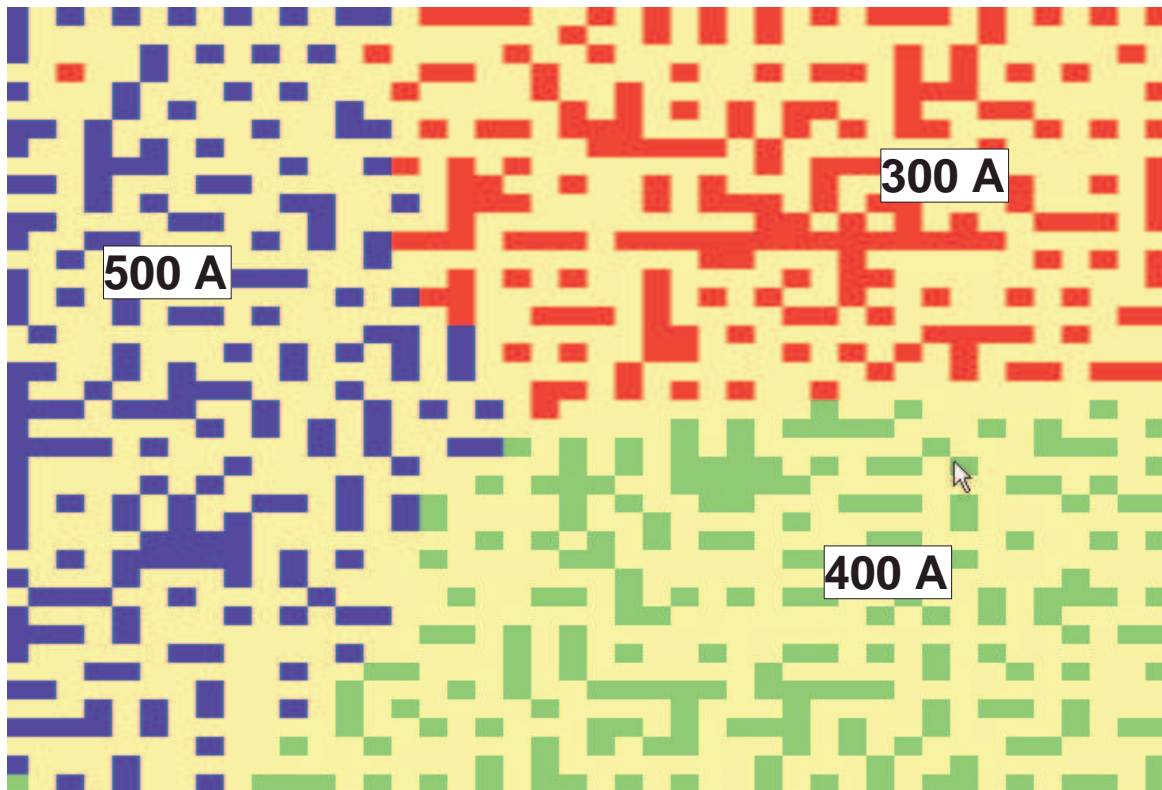


Abbildung 70: Kohonenkarte auf der Datenbasis von jeweils 250 Frequenzspektren bei 3 verschiedenen Stromstärken, APS ( $U=30\text{ V}$ ,  $s=120\text{ mm}$ ,  $v=0,2\text{ m/s}$ ), Chromoxid

Entsprechend dem Wert der Stromstärke wurde jedem Vektor in der Kohonenkarte ein farbiges Rechteck zugeordnet. In Abbildung 70 ist die Kohonenkarte nach 10 Trainingsdurchläufen dargestellt. Die Spektren, welche zu einer Stromstärke von 300 A gehören, sind durch rote Rechtecke gekennzeichnet, 400 A wird grün und 500 A blau dargestellt. Der gelbe Bereich besteht aus Gewichtsvektoren, welche nicht durch Eingangsvektoren besetzt sind, d.h. durch den Algorithmus des Kohonen-Netzes nicht zum „Gewinner“ erklärt worden sind. Zum Verständnis: die Anzahl der Gewichtsvektoren ist 3 mal so groß wie die der Eingangsvektoren; folglich können nicht alle Gewichtsvektoren durch Eingangsvektoren besetzt werden (siehe auch Abbildung 69, S. 93). Das Ergebnis der Mustererkennung ist eindeutig. Es entstehen drei unterschiedliche Bereiche, die jeweils einer Stromstärke zugeordnet werden

können. Die Neuronale Netztechnik kann also genutzt werden, um die SE-Spektren den Prozeßzuständen zuzuordnen.

### 9.5.2 Nachweis nicht on-line regelbarer Prozeßparameter

In diesem Kapitel sollte geklärt werden, ob die Kohonentechnik es erlaubt, auch nicht on-line regelbare Prozeßparameter zu erkennen und zu trennen. Zu diesem Zweck wurden zunächst Musterfehler erzeugt, so wie es bereits im Kapitel 9.4 beschrieben worden ist. Als Bauteil diente diesmal jedoch nicht ein Stahlblock, sondern eine Walzen (Abbildung 71).

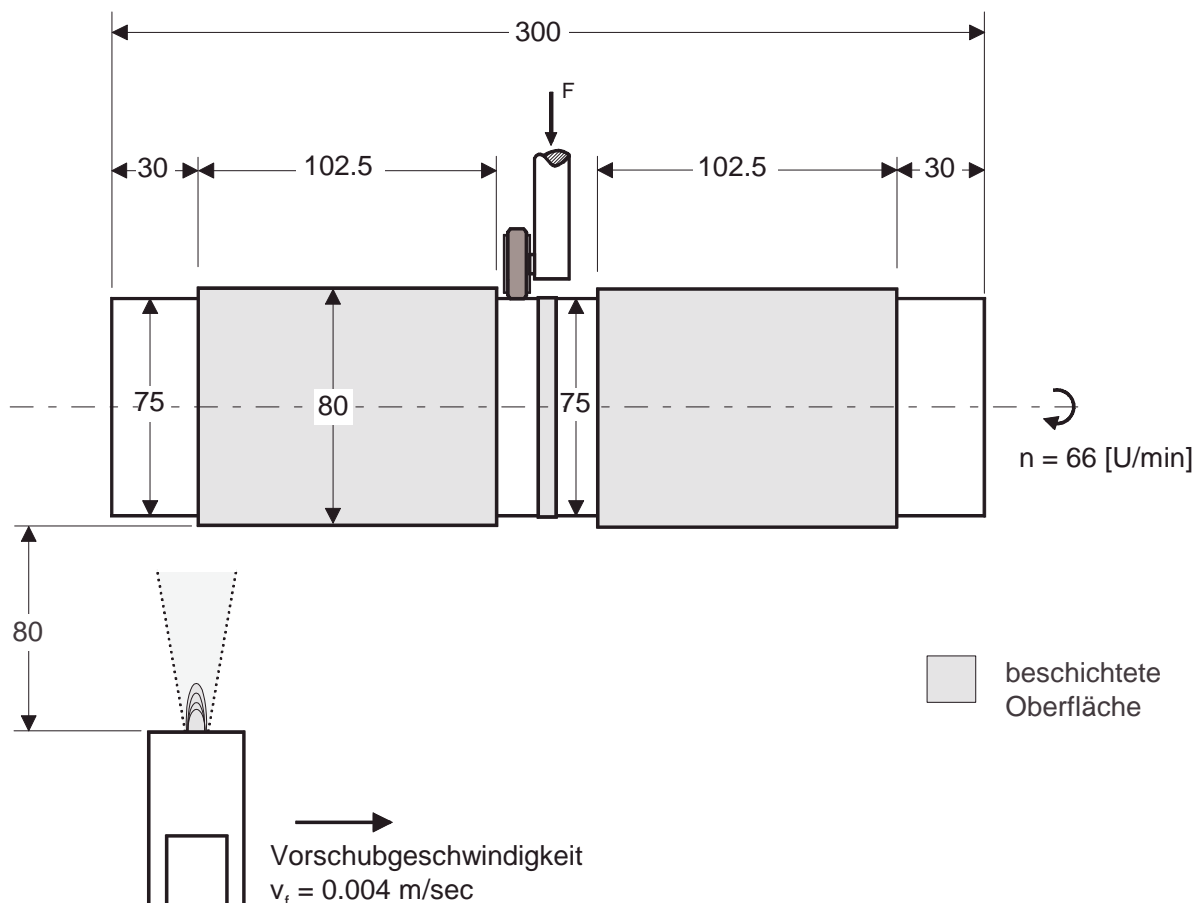


Abbildung 71: Beschichtung einer Walze, APS APS ( $I=500$  A,  $U=30$  V,  $s=120$  mm) Chromoxid

Während der Beschichtung drehte sich die Walze mit 66 Umdrehungen pro Minute, der Vorschub der Spritzpistole betrug 0.004 m/s. Durch diese Parameter läßt sich bei zweimaliger Überfahrt auf die Walze eine Schicht mit einer Dicke von 300  $\mu$ m aufbringen. Die Beschichtung der gesamten Walze dauerte ca. 105 Sekunden. Die in



Abbildung 71 grau markierten Bereiche wurden mit einer Chromoxidschicht versehen. Andere Bereiche, welche nicht beschichtet werden sollten, waren maskiert.

Da sich die Walze während des Beschichtungsvorganges drehte, kam ein Rollsensor zur SE-Messung zum Einsatz. Die Ankopplung des Sensors wurde über ein Weichgummi vorgenommen, das sich auf dem Umfang der Rolle befindet.

Bei dieser Art der Ankopplung wird flüssiges Koppelmittel nicht benötigt. Dies führt zwar zu einem gewissen Verlust an Empfindlichkeit. Aufgrund der Fülle der beim Beschichtungsprozeß entstehenden SE-Signale ist dies jedoch unproblematisch. Die Eigenschaften des Sensors und dessen Verhalten beim thermischen Spritzen sind bereits in Kapitel 7.3.5 (Abbildung 17, S. 39) beschrieben.

Als Datenbasis für das Kohonen-Netz dienten wiederum die Frequenzspektren zwischen 400 kHz und 1 MHz, dabei wurden für jeden Prozeßzustand 100 Spektren verwendet.

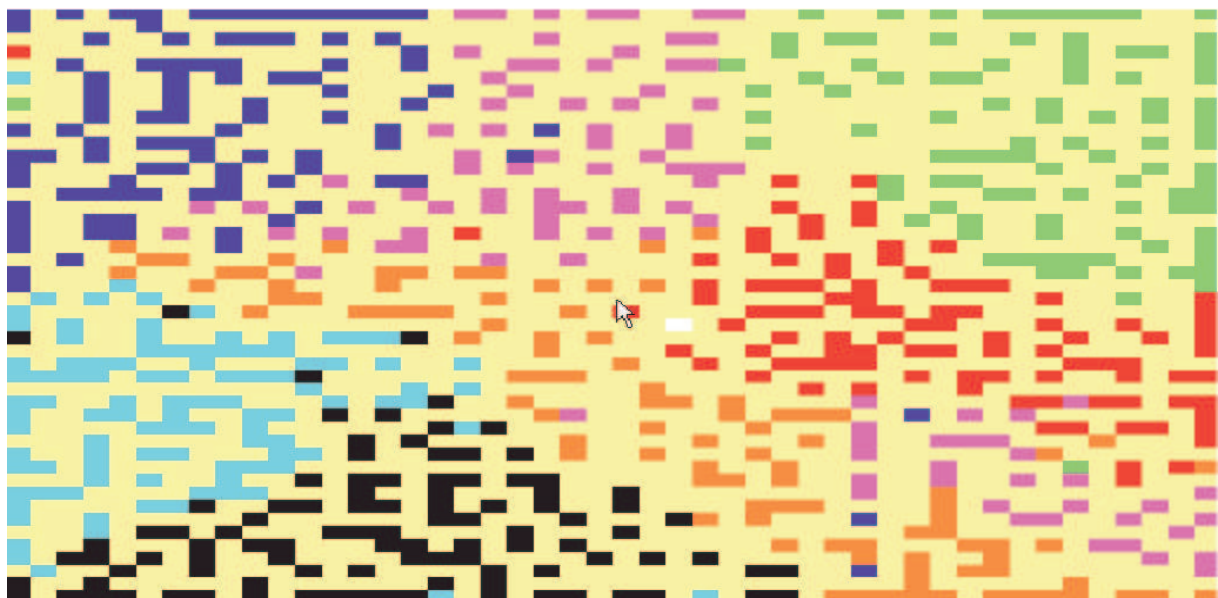


Abbildung 72: Kohonen-Karte mit unterschiedlichen Beschichtungsfehlern

Abbildung 72 zeigt das Ergebnis der Mustererkennung durch das Kohonen-Netz. Dabei lassen sich die SE-Signale, aufgenommen bei optimalen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) Beschichtungsparametern (grün), von allen anderen Prozeß-

zuständen trennen. Somit kann also eine eindeutige Unterscheidung auf der Basis der Frequenzspektren mit dem Neuronalen Netz zwischen einem optimalen (Referenz-Prozeß lt. Tabelle 7, S. 88) und fehlerhaften (exakt: unterschiedlich vom Referenzprozeß) Beschichtungsprozeß vorgenommen werden.

Des weiteren bilden die Frequenzspektren, die bei verschiedenen Stadien des Düsenverschleißes (rosa, orange und rot) aufgenommen wurden, eine gemeinsame Gruppe, die sich klar von denen der fehlerhaften Pulverröhrchen unterscheidet, so daß eine zusätzliche Klassifizierung nach der Fehlerart möglich ist. Die Aufspaltung des rosa Feldes (Düsenverschleiß) ist der Beleg für die Ähnlichkeit der SE-Signale gemessen bei den verschiedenen verschlissenen Düsen: Es deutet sich dadurch bereits eine Durchmischung an, das heißt die „SE-Signale Düsenverschleiß“ bilden eine Fehlerklasse. Das Neuronale Netz liefert damit vergleichbar gute Ergebnisse wie die Auswertung mittels Korrelationskoeffizienten.

### **9.5.3 Trainingszeiten**

In Hinblick auf einen industriellen Einsatz der Neuronalen Netztechnik kommt den Trainingszeiten eine besondere Bedeutung zu. So ist z.B. ein bauteilspezifisches Training des Neuronalen Netzes nur möglich, wenn die Trainingszeiten in vertretbaren Größen liegen.

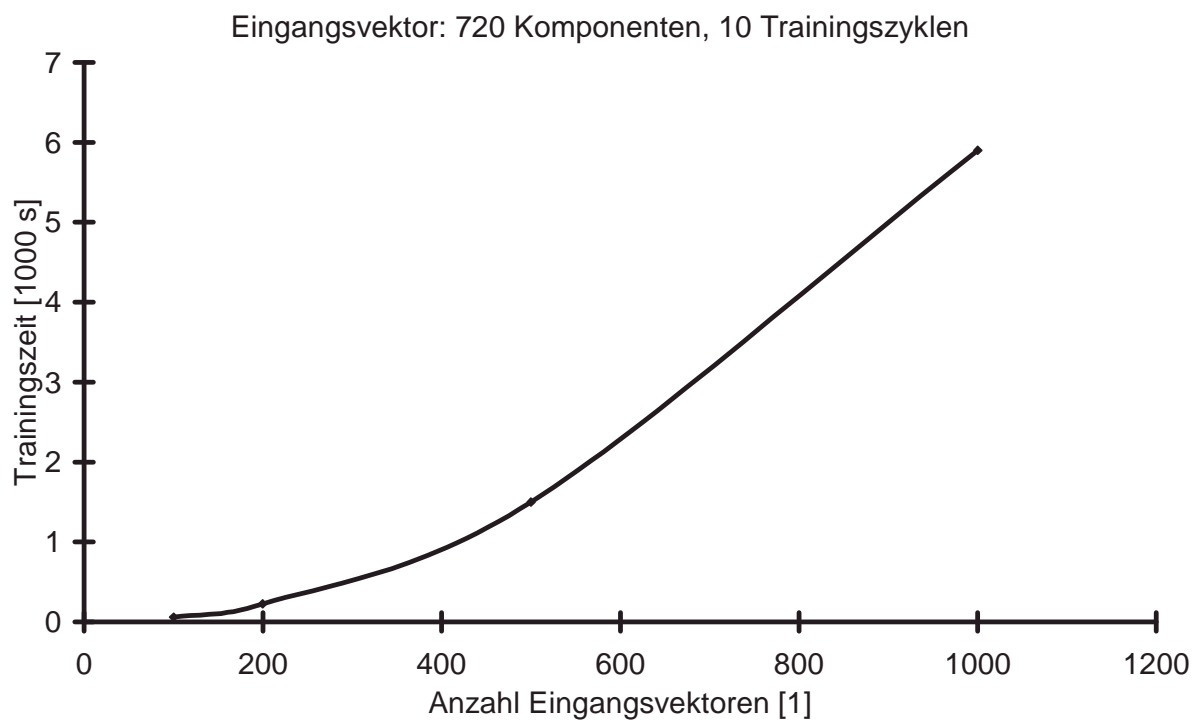


Abbildung 73      *Abhängigkeit der Trainingszeit von der Anzahl der Eingangsvektoren*

Die Trainingszeiten des Netzes werden durch die Eingabevektoren und die vorhandene Rechnertechnik beeinflusst. Im vorliegenden Fall wird zur Berechnung ein handelsüblicher PC (Pentium I, Taktfrequenz 200 MHz) eingesetzt. Die Eingabevektoren beeinflussen durch ihre Anzahl und Größe (Anzahl der Komponenten) die Trainingszeit.

Zwischen der Anzahl der Eingangsvektoren und der Trainingszeit kann ein nahezu quadratischer Zusammenhang nachgewiesen werden (Abbildung 73). Die Größe der Kohonen-Karte (Anzahl der Gewichtsvektoren) richtet sich nach der Anzahl der Eingangsvektoren. Die Anzahl der Rechenoperationen hängt quadratisch von der Anzahl der Eingangsvektoren gemäß Gleichung 14 ab.

Gleichung 14      
$$N_0 = N_A^2 \cdot 3 \cdot 10$$

$N_0$     :=    Anzahl Rechenoperationen

$N_A$     :=    Anzahl Eingangsvektoren



Abbildung 74: *Abhängigkeit der Trainingszeit von der Größe der Eingangsvektoren*

Die Größe der Kohonen-Karte, in diesem Fall 3 mal der Anzahl der Eingangsvektoren, und die Anzahl der Trainingszyklen, in diesem Fall 10, sind die restlichen Größen in Gleichung 14. Die Anzahl der Komponenten der Eingangsvektoren beeinflusst die Anzahl der Rechenoperationen nicht, allerdings deren Dauer. Bei den Rechenoperationen handelt es sich um die Bildung von Skalarprodukten, die Rechenzeit hängt hier linear von der Vektorgröße ab. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 74 bestätigt.

Die Trainingszeiten des Netzes liegen somit im Bereich von ca. 2 Stunden.

## 10 Konsequenzen

Eine Hauptproblematik des Einsatzes der Schallemissionsanalyse (SEA) zur Überwachung des thermischen Spritzprozesses stellt die enorme Anzahl von Spritzpartikeln und die daraus resultierende Anzahl von SE-Signalen dar. Aus diesem Grund wurden zwei grundsätzlich verschiedene Wege verfolgt, um dieses Problem zum einen zu umgehen und zum anderen vollständig zu lösen. Dabei wurde im ersteren Fall ein Wellenleiter verwendet, welcher durch die geringen Abmessungen seiner Meßfläche die Anzahl der registrierten SE-Signale stark reduziert und so eine Auswertung mit „konventionellen“ Methoden der SEA zuläßt. Zweitens wurden direkt am zu beschichtenden Bauteil die SE-Signale aufgenommen. Zu deren Auswertung wurden wegen der extremen Signalüberlagerung, neue Methoden und Algorithmen entwickelt und angewendet.

Grundsätzlich müssen bei der Überwachung des thermischen Spritzprozesses breitbandige SE-Sensoren eingesetzt werden, dazu eignen sich auch Ultraschallprüfköpfe. Breitbandige Sensoren haben entscheidende Vorteile. Die Abklingzeit ist gering und die SE-Signale sind im Vergleich zu resonanten SE-Sensoren wenig durch das Schwingverhalten des Sensors geprägt. Dies gilt sowohl für den Frequenzbereich als auch für den Zeitbereich der SE-Signale. Kurze Abklingzeiten vermindern die SE-Signalüberlagerung.

Breitbandige SE-Sensoren sind weniger empfindlich als resonante. Dies ist der Grund, warum gerade in der SEA oftmals resonante Sensoren eingesetzt werden. Es stehen dabei Anwendungen im Vordergrund, bei denen sehr energiearme Vorgänge in der Mikrostruktur von Werkstoffen mit hochempfindlichen Sensoren nachgewiesen werden. Dieser Fall liegt bei der Überwachung des thermischen Spritzprozesses nicht vor, unabhängig davon, ob über einen Wellenleiter oder direkt am zu beschichtenden Bauteil gemessen wird. Die SE-Amplituden sind ausreichend hoch, darüber hinaus ist die Ereignisrate sehr hoch.

### 10.1 SE-Messung über Wellenleiter

Es kann festgestellt werden, daß die Schallemissionsanalyse (SEA) als zerstörungsfreies Prüfverfahren bei der Überwachung der Spritzpartikeleigenschaften Kenngrößen liefert, die zu einer Bewertung der Spritzpartikel und damit des Schichtprozesses

führen können. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen den SE-Signalen und den Eigenschaften der Spritzpartikel. Die SEA ist nicht nur zur Überwachung von On-line-Prozeßparametern, sondern auch von den problematischen, nicht on-line regelbaren Parametern verwendbar. Die in Kapitel 8 beschriebene Vorgehensweise ist geeignet, um die SE-Sensorik zyklisch als Referenzpunkt zur Kontrolle der Spritzpartikel anzufahren. Die beiden gemessenen SE-Parameter, Amplitude und Impulsfläche, hängen direkt von der Kopplung des SE-Prüfkopfes an den Wellenleiter ab. Beim Einsatz dieser Methode ist somit eine reproduzierbar gute Ankopplung des SE-Sensors zu gewährleisten.

Die Untersuchungen wurden beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen durchgeführt. Als Beschichtungsmaterial wurde Stahldraht verwendet. Durch den Einsatz der SEA können Abweichungen vom optimalen Beschichtungsprozeß erkannt werden. Dabei haben Partikelgeschwindigkeit, -masse und -viskosität den entscheidenden Einfluß auf die Amplitude der SE-Signale. Die Überlagerung dieser Größen ist jedoch sehr komplex, so daß die Erkennung der Ursachen für eine Prozeßabweichung auf Basis des Kegelwellenleiters nicht gelingt. Der Prozeß muß also angehalten werden und die Fehlerursache muß vom Anwender gesucht werden. Demzufolge kann durch die Messung von SE-Amplitude und SE-Ereignisrate am Kegelwellenleiter allein keine Regelung aufgebaut werden. Abbildung 25 (S. 49) bestätigt diese Aussage. In diesem Fall können die Prozesse zum einen mit verschlissener Düse und zum anderen mit fehlendem Keramikring zwar als eindeutig schlechter Prozeß erkannt werden. Die Unterscheidung der beiden Prozeßfehler anhand des Impulsflächenverlaufs gelingt jedoch nicht.

Eine Änderung der Prozeßgrößen beeinflusst zwangsläufig die SE-Signale. Somit haben auch der Beschichtungswerkstoff, die Spritzdüse, die Einstellung des Zerstäubergasdrucks oder auch die Auswahl der Spritzdüse veränderte akustische Ergebnisse zur Folge. Das heißt, das für jeden Beschichtungsprozeß abhängig von Größen wie z.B. Beschichtungswerkstoff, Spritzpistole und On-line-Prozeßparametern zunächst der SE-Signalverlauf für den optimalen Zustand gemessen werden muß. Erst dann können Abweichungen von diesem Zustand während der Fertigung erkannt werden. Diese Vorgehensweise ist relativ einfach und

verlangt nur geringen Aufwand. Die ermittelten Werte können in einer Datenbank gespeichert und bei Bedarf abgerufen werden.

Das diskontinuierliche Anfahren der Sensorik mit der Spritzpistole kann in der Regel problemlos vorgenommen werden. Durch die modernen Manipulatorsteuerungen können sowohl Zeitpunkt, Geschwindigkeit und Spritzabstand beim Überfahren festgelegt werden. Insbesondere der Zeitpunkt des Überfahrens der SE-Sensorik bzw. das Zeitintervall kann dann abhängig vom Bauteil und dessen speziellen Anforderungen gewählt werden. Die Meßsensorik und die Auswerteeinheit können dann fest in einer Spritzkabine installiert werden.

## **10.2 SE-Messung am Bauteil**

In Kapitel 9 (Erweiterung der Methodik zur SE-Messung direkt am Bauteil) wird die Aufnahme der SE-Signale direkt am zu beschichtenden Bauteil beschrieben. Damit soll akustisch die Schichtentstehung selbst überwacht werden. Durch die hohe Anzahl an Spritzpartikeln entstehen kontinuierliche SE-Signale, welche mit „konventionellen“ Methoden der SEA nicht ausgewertet werden können (Abbildung 31, S. 55). Unter „konventionellen“ Methoden sind SE-Parameter wie die Signaldauer, Amplitude und Ereignisanzahl (Tabelle 1, S. 17) zu verstehen. Handelsübliche SE-Geräte können nicht verwendet werden, da diese auf der Signaltrennung über das Setzen einer Triggerschwelle beruhen. Aus diesem Grund erfolgte die Signalaufnahme durch das kontinuierliche Schreiben der Zeitsignale auf einen Festspeicher (Kapitel 7.2).

In Kapitel 9.3.1 (Schmalbandige Auswertung der SE-Signale) wird eine Möglichkeit dargestellt, die enorme Anzahl an SE-Signalen zu reduzieren. Durch das Filtern mit im Vergleich zum Frequenzspektrum der SE-Signale extrem schmalbandigen Bandfiltern, läßt sich Anzahl der SE-Signale derart vermindern, daß einzelne, von einander getrennte SE-Signale vorliegen (Abbildung 34). Diese einzelnen Ereignisse stehen in keinem direkten Zusammenhang mit den einzelnen Spritzpartikeln. D.h., die schmalbandige SE-Signalfilterung führt nicht dazu, daß einzelne SE-Signale dem Auftreffvorgang einzelner Spritzpartikel zugeordnet werden können. Es findet lediglich eine starke Datenreduktion mit dem Ziel statt, bewährte SE-Auswertelgorithmen anwenden zu können. Trotz der massiven Datenreduktion, kann der Zusammenhang

zwischen der Stromstärke und den entstehenden SE-Signalen nachgewiesen werden (Abbildung 35, S. 58). Dies ist beachtlich und belegt das enorme Potential, welches in dem Verfahren der SEA bei der Überwachung des thermischen Spritzprozesses steckt. Die Überwachung des Spritzprozesses auf Basis einer schmalbandigen Signalfilterung ist wegen des Verzichts auf ca. 99 % der Signalinformation nicht empfehlenswert.

Im folgenden Schritt wurde die Gesamtheit der SE-Signale betrachtet. Dazu ist das Frequenzspektrum der SE-Signale hervorragend geeignet. Dreidimensionale Darstellungen dokumentieren die Abhängigkeit der Signalamplitude einerseits von der Frequenz und andererseits von der Überfahrzeit (Abbildung 37, S. 60). Sie verdeutlichen das gute Signal-Rausch-Verhältnis, welches mit dem gewählten Versuchsaufbau erreicht werden konnte. Weiter belegen sie den Anstieg der Signalamplitude, sobald Spritzpartikel auf das Bauteil treffen. Darüber hinaus verdeutlichen sie sehr anschaulich den Einfluß der Bauteileigenfrequenzen auf das Spektrum der SE-Signale. Es wird klar, daß es sich bei dem so dargestellten Meßergebnis um die Überlagerung von Bauteileigenfrequenzen und Signalfrequenzen, hervorgerufen durch die Spritzpartikel selbst, handelt. Der Einfluß von unterschiedlichen Prozeßzuständen äußert sich in diesen 3D-Plots vornehmlich in der Signalamplitude (vergl. Abbildung 37 und Abbildung 38, S. 60). Eine veränderte Bauteilgeometrie führt zu veränderten Bauteileigenfrequenzen und somit zu völlig anderen Meßergebnissen, dies ist ein weiteres Ergebnis der 3D-Plots (Abbildung 39, S. 64).

Da das Frequenzspektrum offensichtlich geeignet ist, um Aussagen über den Spritzprozeß treffen zu können, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Dazu bietet sich das über die Zeit gemittelte Frequenzspektrum der SE-Signale einer Überfahrt an. Die Mittelwertbildung ist sinnvoll und möglich, da die Amplitudenwerte der einzelnen Frequenzen der Spektren über die Überfahrzeit normalverteilt sind (Abbildung 41).

Mit den gemittelten Frequenzspektren liegt zunächst eine für die Beschichtung eines Bauteils bzw. Bauteilbereiches charakteristische Größe vor. Diese charakteristische Größe ist geprägt von den Frequenzanteilen der Spritzpartikel und von den Bauteileigenfrequenzen. Die Bauteileigenfrequenzen sind gegeben durch die Bauteilge-



omtrie und den Werkstoff. Abhängig von der Bauteilgeometrie liegen die Abstände der meßbaren Bauteileigenfrequenzen bei einer Bauteildicke von 50 mm (Stahl) bei ca. 60 kHz. Diese relativ niedrigen Frequenzanteile überlagern die höherfrequenten Anteile, welche erzeugt werden durch die Spritzpartikeleigenschaften. Ein Hochpaß erlaubt die Abtrennung der Bauteileigenfrequenzen. Es entstehen so Frequenzspektren, die unabhängig sind von der Bauteilgeometrie und vom Werkstoff.

Diese Vorgehensweise erlaubt die bauteilunabhängige Erkennung von Prozeßzuständen. Es wurden so Prozeßzustände erkannt, welche gezielt durch die Variation der Stromstärke eingestellt wurden. Darüber hinaus wurden auch nicht on-line regelbare Prozeßparameter untersucht. Zu den untersuchten nicht on-line regelbaren Prozeßparameter zählen der Düsenverschleiß und die Pulvereinschußbedingungen. Die gewählten nicht on-line regelbaren Prozeßparameter verändern die Struktur und die Eigenschaften der entstehenden Schichten stark (Tabelle 7, S. 88). Nicht on-line regelbare Prozeßparameter lassen sich mittels der entwickelten Algorithmen nachweisen. Dabei gelingt nicht nur eine Gut-Schlecht-Analyse, sondern darüber hinaus eine Fehlerklassifizierung. Bei einem industriellen Einsatz ist es möglich, nicht nur den Prozeß anzuhalten, sondern auch sofort eine Fehlerklasse auszugeben. Darauf aufbauend ist der Aufbau einer Prozeßregelung denkbar.

Der Vergleich bzw. die Analyse der Frequenzspektren kann über verschiedenen Verfahren vorgenommen werden. Bei den dargestellten Auswertelgorithmen erweisen sich zwei Verfahren als gleichermaßen geeignet, die Bildung von Korrelationskoeffizienten sowie der Einsatz von Neuronalen Netzen (Kohonen). Die Bildung des Korrelationskoeffizienten ist ein wissenschaftlich anerkanntes Mittel zum Nachweis von Zusammenhängen zwischen den gemessenen und vorverarbeiteten Frequenzspektren /80/. Die Neuronalen Netze weisen eher den Weg hin zur praktischen industriellen Anwendung. Diese Netze können sowohl bauteil- und werkstoffunabhängig als auch bauteilspezifisch trainiert und eingesetzt werden. Dies entspricht Anforderungen in der Einzelteil- und Serienfertigung.

Das so entwickelte Verfahren ist – unabhängig davon, ob über Korrelationskoeffizienten oder neuronale Netze ausgewertet wird – vergleichend. Das heißt, es werden die SE-Signale von optimalen Prozeßzuständen mit den im Beschichtungspro-

zeß anfallenden SE-Signalen verglichen. Diese vergleichende Vorgehensweise ist im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung gängig. Man denke nur an die erforderlichen Musterfehler im Bereich der Ultraschall- und Wirbelstromprüfung. Aus dieser Vorgehensweise ergeben sich gewisse Konsequenzen.

Jede Veränderung sowohl im Prozeß als auch in der Meßkette muß vorher berücksichtigt werden. Dabei ist z.B. die Spritzpistole, das Spritzpulver oder auch der SE-Sensor zu nennen. Das heißt, findet an einer Stelle einer Veränderung statt, so müssen die den „optimalen“ Prozeß beschreibenden SE-Signale neu aufgenommen werden und der entsprechende Korrelationskoeffizient neu gebildet oder das neuronale Netz neu trainiert werden.

Der Einfluß der Position der Spritzpistole relativ zum Sensor auf die SE-Signale ist relativ gering. Unterschiedliche Partikeleigenschaften beeinflussen die entstehenden Frequenzspektren weitaus stärker. Bei sehr großen Bauteilen (ab ca. 500 mm Länge) ist es aber allein aufgrund der Signaldämpfung empfehlenswert, mobile Sensoren mit der Manipulatoreinheit mitzuführen.

Der Übertragbarkeit der Frequenzspektren auf andere Bauteilgeometrien sind Grenzen gesetzt. Sind die Bauteilabmessungen kleiner als die Wellenlänge (ca. 5 mm, abhängig von der Schallgeschwindigkeit und somit vom Werkstoff), ist eine Übertragbarkeit nicht mehr möglich. Dies ist begründet in der Entstehung von geführten Wellen, sogenannten Plattenwellen. Plattenwellen sind sehr starker Dispersion unterworfen, was die Frequenzspektren extrem beeinflussen kann. Auch wenn die Übertragbarkeit bei solch geringen Bauteilabmessungen nicht mehr gegeben ist, so können diese Bauteile jedoch auch weiterhin – zwar nur bauteilspezifisch – durch die Auswertung der Frequenzspektren überwacht werden. In der Serienproduktion solcher Bauteile können Neuronale Netze trainiert und effizient eingesetzt werden. In der industriellen Praxis besteht jedoch eher Bedarf zur Überwachung großer und massiver Bauteile wie z.B. Walzen in der Papierindustrie als von kleinen, dünnen „Plättchen“. Dies ist darin begründet, daß bei großen Bauteilen erstens eine erhebliche Wertschöpfung durch die sehr lange Beschichtungsdauer im Bereich von Stunden stattfindet. Zweitens verändern sich gerade während dieser langen Beschichtungs-

---

zeiten die nicht on-line regelbaren Prozeßgrößen infolge von Verschleiß und drittens schließen diese Bauteilgeometrien eine zerstörende Prüfung aus.

## 11 Ausblick und Zusammenfassung

Die Qualität von thermisch gespritzten Schichten unterliegt prozeßbedingt starken Schwankungen. Aus diesem Grund wurde hier eine Vorgehensweise entwickelt, auf der Basis der Schallemissionsanalyse (SEA) den Spritzprozeß zu überwachen. Dabei wird der Körperschall, welcher durch das Auftreffen der Spritzpartikel auf das Bauteil entsteht, aufgenommen und analysiert.

Zur Aufnahme des Körperschalls bestehen zwei Möglichkeiten. Zum einen die Aufnahme direkt am Bauteil und zum anderen über eine Referenzprobe, welche sich in der Spritzkammer befindet und diskontinuierlich durch die Spritzpistole angefahren wird. Beide Möglichkeiten wurden beim Erstellen dieser Arbeit sowohl theoretisch als auch experimentell eingehend untersucht. Mit einem kegelförmigen Wellenleiter wurde die Meßfläche soweit reduziert, daß bedingt durch den Partikelauflauf transiente SE-Signale (Burst-Signale) aufgenommen werden können. Diese transienten SE-Signale lassen sich mit bewährten Methoden der SEA und somit auch mit handelsüblichen, kommerziell erwerbbaaren SE-Analyse-Systemen auswerten.

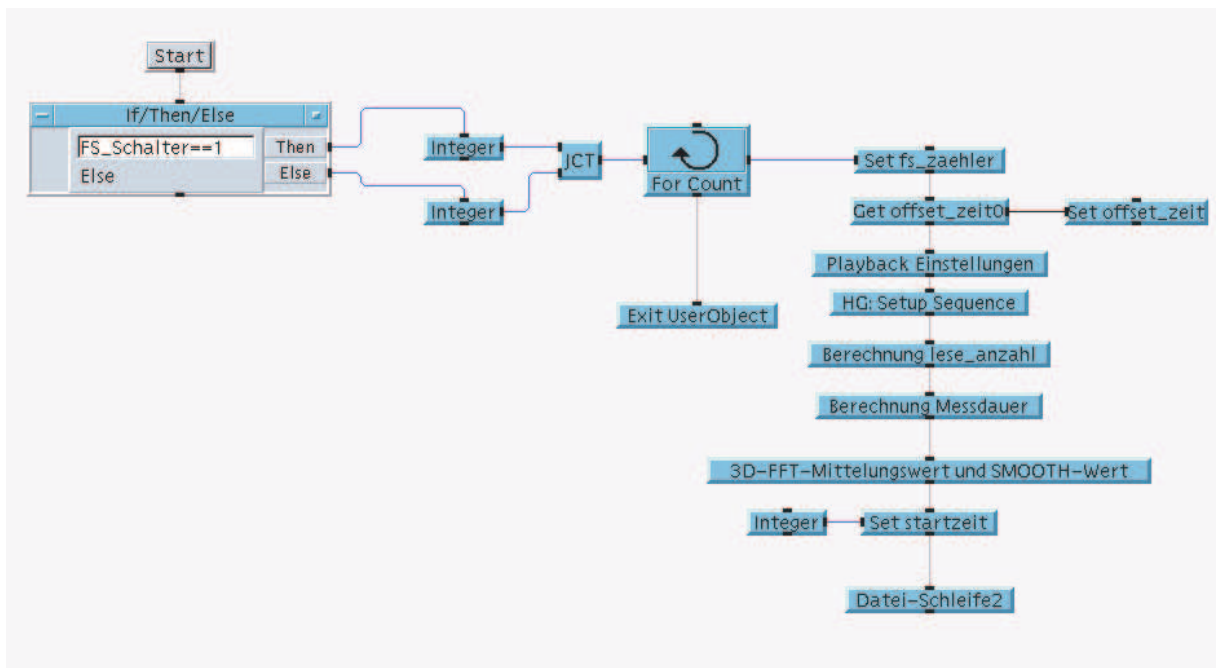
Die Messung des Körperschalls direkt am Bauteil führt zu einer enormen Signalüberlagerung, d.h. es entstehen kontinuierliche SE-Signale. Aus diesem Grund wurden neue Auswertalgorithmen entwickelt und angepaßt, welche trotz Signalüberlagerung eine Aussage über den Spritzprozeß zulassen. Durch die Auswertung der entstehenden Frequenzspektren beim gleichzeitigen Einsatz breitbandiger SE-Sensoren, konnte das Problem der Signalüberlagerung gelöst werden. Dabei war es erforderlich, die Bauteileigenfrequenzen aus den Spektren herauszufiltern, um eine bauteilunabhängige Überwachung zu gewährleisten.

Auf der Basis der Frequenzspektren lassen dann unabhängig von der Bauteilgeometrie Aussagen über den Prozeßzustand machen. Nicht on-line regelbare Fehler wie Düsenverschleiß und fehlerhafter Pulvereinschuß können jetzt mittels SEA erkannt und klassifiziert werden. Die Auswertung der Frequenzspektren kann zum einen durch den Korrelationskoeffizienten und zum anderen auch durch Neuronale Netze (Kohonen-Netze) vorgenommen werden.

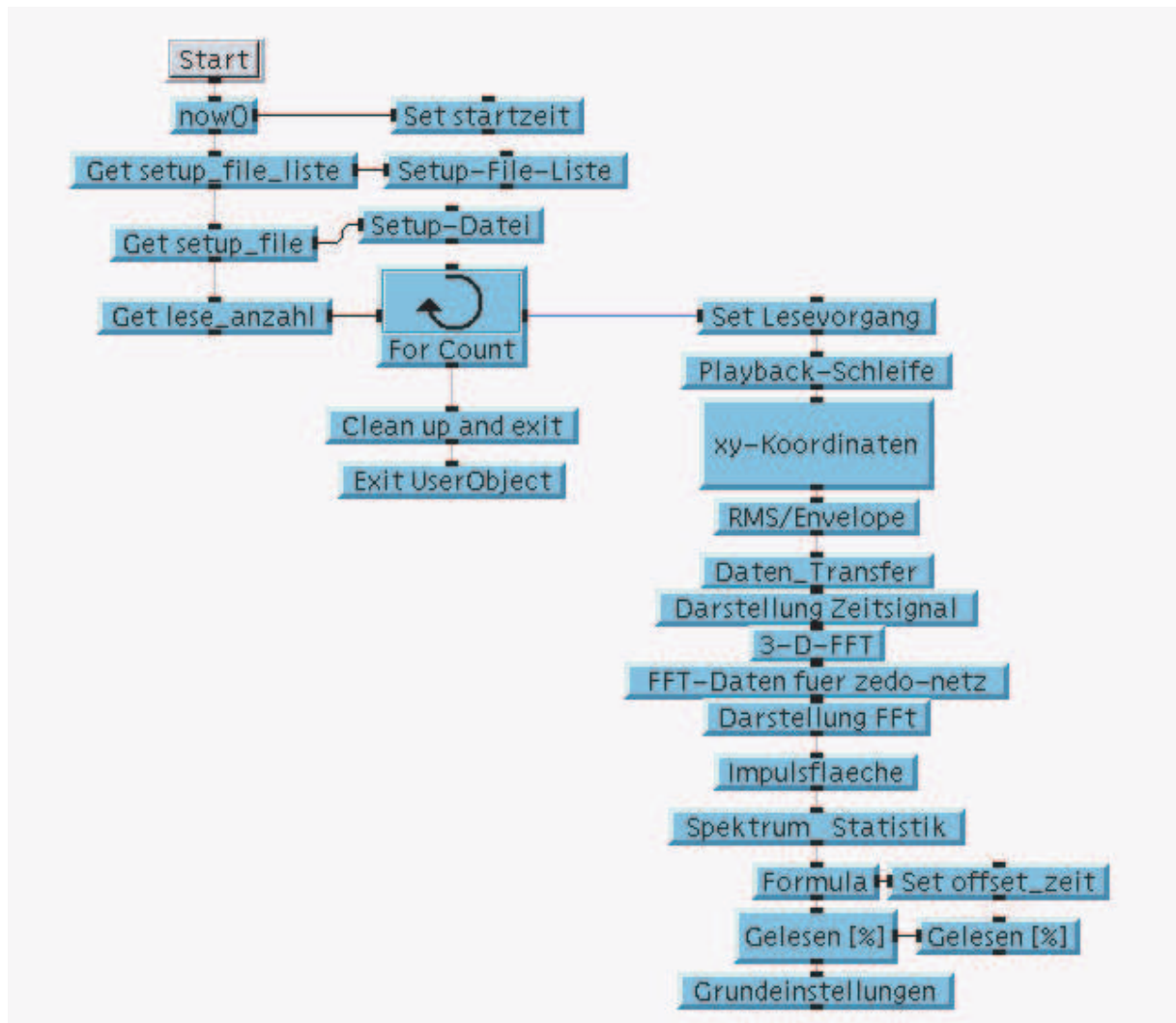
Zukünftig erscheint auf der Basis der SEA eine Prozeßregelung beim thermischen Spritzen möglich.

## 12 Quellcodes

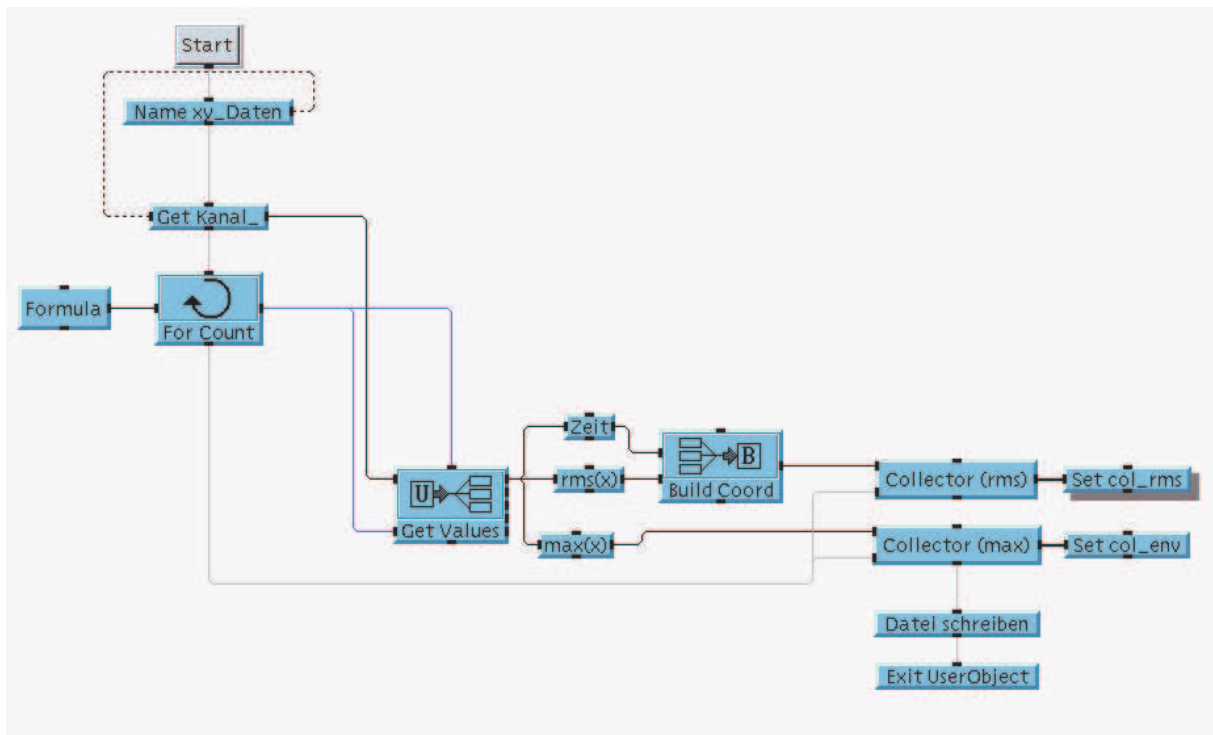
### 12.1 Übersicht Auswerteprogramm



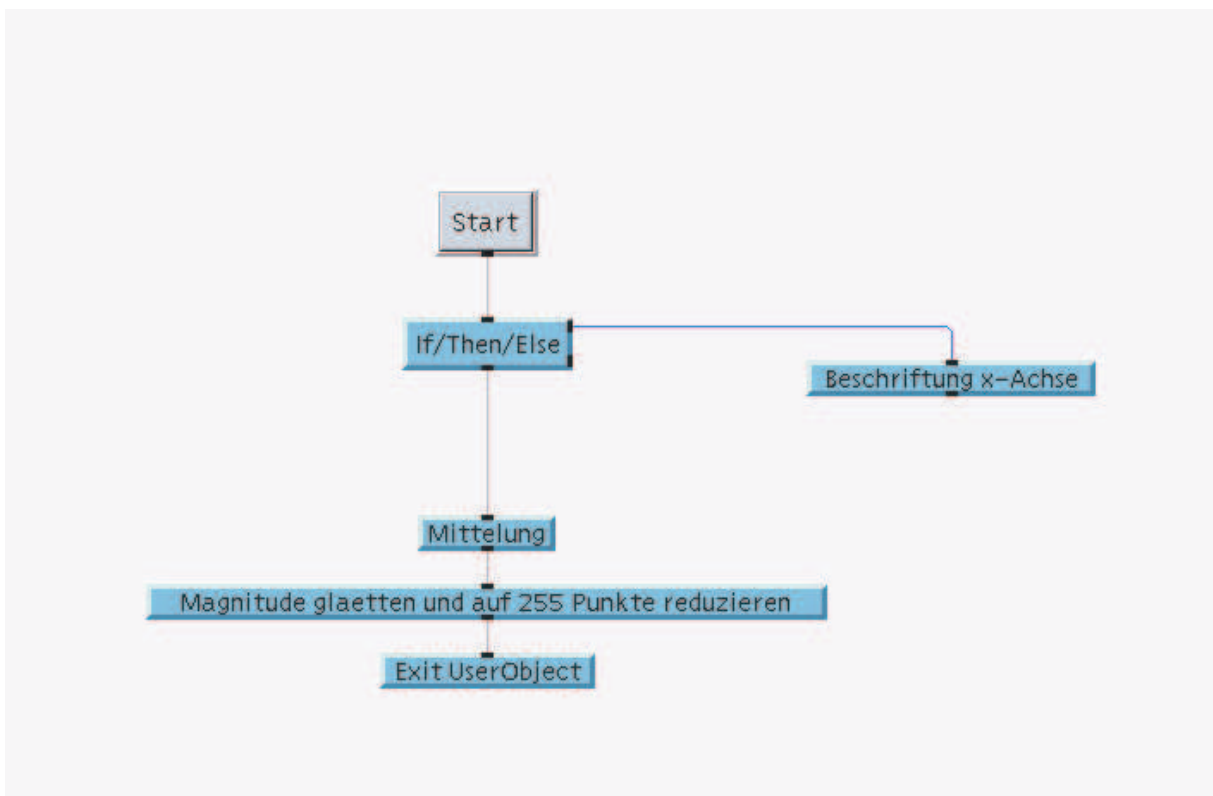
## 12.2 Daten lesen und Datenverarbeitung



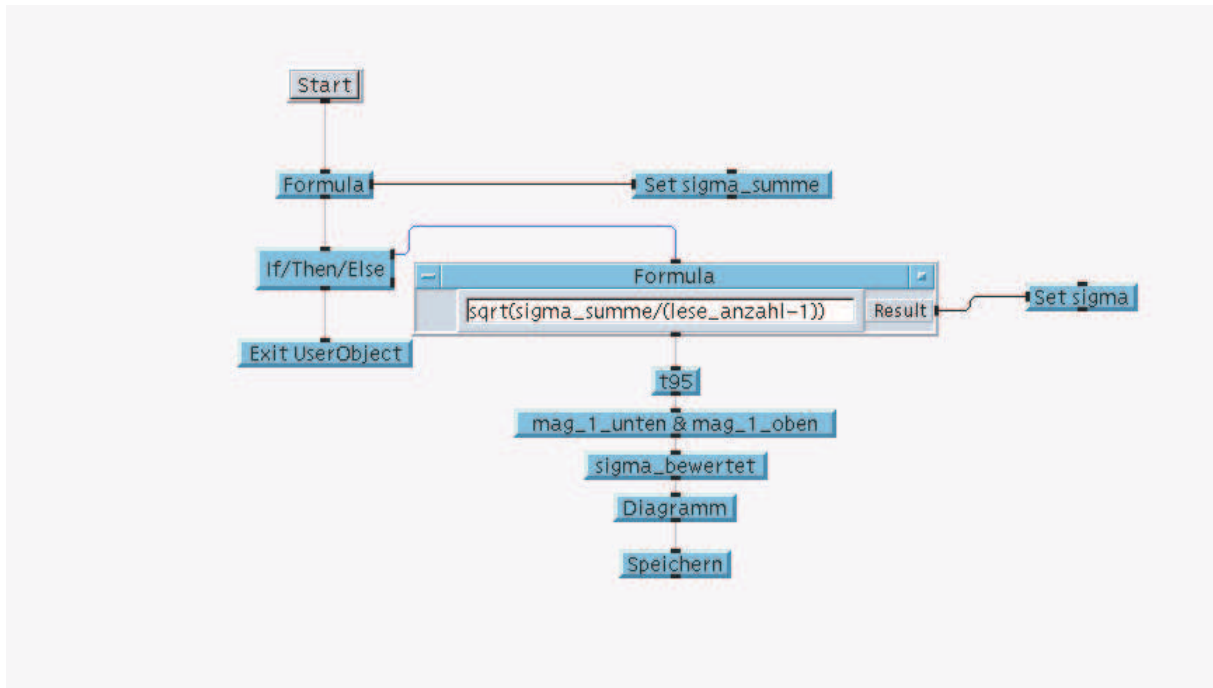
### 12.3 Berechnung von RMS-Wert und von der Einhüllenden



### 12.4 Berechnung des 3D-Plots



## 12.5 Berechnung der Normalverteilung





**13 Lebenslauf**

Gerd Reuss, geb. 22.8.1964 in Düsseldorf, verheiratet

|                   |  |
|-------------------|--|
| 08/1970 - 07/1973 | Bodelschwingh-Grundschule in Düsseldorf  |
| 08/1973 - 07/1983 | Comenius-Gymnasium in Düsseldorf, Abitur   |
| 01/1987 - 06/1990 | Studentische Hilfskraft am Lehrstuhl für Fertigungsvorbereitung der Universität Dortmund |
| 09/1989 - 12/1990 | Blechwarenfabrik Gruß&Co in Hilden, EDV-Beratung als Freier Mitarbeiter                  |
| 10/1983 - 04/1991 | Studium des Maschinenbaus an der Universität Dortmund                                    |
| 05/1991 - 10/1999 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Qualitätswesen der Universität Dortmund  |
| ab 11/1999        | WITTE-Velbert GmbH & Co.KG, Qualitätsmanagement  |

**14 Literatur**

- 1 Steffens, H.-D.; Haumann, D.: Haftung und Verschleißverhalten plasmagespritzter Keramiksichten für den Einsatz in Schraubenverdichtern. DVS-Berichte, Band 175, Deutscher Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf, S. 262-265, ISBN 3-87155-480-4, 1996
- 2 Berger, L.M.; Nebelung, M.; Maentylae, E.; Vuoristo, P.: Hartmetallähnliche Schichten gegen Verschleiß und Korrosion. Thermisches Spritzen. Der Maschinenmarkt, Band 102, Heft 8, S. 28-33, 1996
- 3 Hnida, U.: Entwicklungspotential – Keramik. Widerstandsfähige Gasturbinenschaufeln mit metallischen und keramischen Schichten. Energie, Essen, Band 46, Heft 12, S. 46-48, 1994
- 4 Heine, B.: Thermisch gespritzte Schichten. Metall – Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft, Band 49, Heft 1, S. 51-57, 1995.
- 5 Gudenau, H.W.; Jakobi, D.; Uhlenbrauck, G.D.; Hoberg, H.: Standzeitverlängerung von Wärmetauschern durch Beschichtungen. 12. Aachener Stahlkolloquium 1997, Metallurgie von Eisen und Stahl, 19.6.-20.6.1997 in Aachen, S. V16/1-S.V16/13, 1997
- 6 Arends, S.: Erhebliche Standzeiterhöhung von Anlagen durch thermisches Spritzen. Bergbau, Band 48, Heft 4, S. 162-163, 1997
- 7 Lugscheider, E.; Jungklaus, H.: Thermisch gespritzte Keramiksichten – Möglichkeiten und Anwendungen. Korrosion und Verschleiß von keramischen Werkstoffen, 2. Statusseminar, Gemeinschaftsausschuß Hochleistungskeramik des DKG und DGM, Aachen, 15.-17.3.1994, S.153-159, Köln: Deutsche Keramische Gesellschaft (DKG), ISBN 3-925543-13-9, 1994
- 8 Steffens, H.-D.; Drozak, J.; Weichert, H.T.: Transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen von Grenzflächenbereichen in atmosphärisch plasmagespritzten Ni/Al-Schichtverbundwerkstoffen. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Symp. der Deutschen Ges. für Materialkunde, Chemnitz, 17.-19.6.1993, S. 627-634, ISBN 3-88355-188-0, 1993
- 9 Kiniewald, D.: Vorbehandlung des metallischen und keramischen Substrates Strahlen unter keramischen Plasmaspritzüberzügen. DVS-Berichte, Band 152, Deutscher Verband für Schweißtechnik, Düsseldorf, S. 118-122, ISBN 3-87155-457-X, 1993
- 10 Fersen v. O.: Motorenbau läuft auf Aluminiumkurs. Automobil: Bei neuen Aggregaten setzen die Konstrukteure immer häufiger auf Leichtmetall. VDI-Nachrichten, Band 51, Heft 31, S.26, 1997
- 11 Hankirk, M.; Hansen, D.S.: Metallized coatings for pressure vessel corrosion. Materials performance, Band 33, Heft 9, S. 31-34, 1994
- 12 Leushake, U., Krell, T., Schulz, U.: Graded thermal barrier coatings for gas turbine applications. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Band 28, Heft 8, S. 391-394, 1997
- 13 Dawson, R.J.; Thompson, C.B.: A guide to weld and thermal spray hard facing in the pulp and paper industry. Materials Performance, Band 30, Heft 11, S. 70-73, 1991

- 14 Pfender, E; R. Spores; W.L.T. Chen: A new look at the thermal and gas dynamic characteristics of a plasma jet. International Journal of Materials and Product Technology, Band 10, Heft 3-6, S. 548-565, 1995
- 15 Zeller. R.; J. Domnick; E. Schubert; H.W. Bergmann: Simultaneous measurement of particle size distribution and velocity using PDA. VDI-Berichte, Band 1166, S. 31-38, Düsseldorf: VDI, ISBN 3-18- 091166-2, 1995
- 16 Steffens, H.-D.; K. Nassenstein: Thermal spraying: A review of 1993. Powder Metallurgy International, Band 25, Heft 6, S. 280-284, 1993
- 17 Heath, G.R.; P.A. Kammer: The high temperature erosion behaviour of arc-sprayed coatings. DVS-Berichte, Band 175, S. 76-79, Düsseldorf: DVS-Verl., ISBN 3- 87155-480-4, 1996
- 18 Fussell, P.S.; H.O.K. Kirchner; F.B. Prinz; L.E. Weiss: Controlled microstructure of arc-sprayed metal shells. Journal of Thermal Spray Technology, Band 3, Heft 2, S. 148-161, 1994
- 19 Zurecki. Z; D. Garg; D. Bove: Electric arc deposition of carbon steel coatings with improved mechanical properties. Journal of Thermal Spray Technology, Band 6, Heft 4, S. 417-421, 1997
- 20 Dallaire. S.; H. Levert: Development of cored wires for improving the abrasion wear resistance of austenitic stainless steel. Journal of Thermal Spray Technology, Band 6, Heft 4, S. 456-462, 1997
- 21 Rogers, F.S.: Thermal spray for commercial shipbuilding. Journal of Thermal Spray Technology, Band 6, Heft 3, S. 291-293, 1997
- 22 Daniel, R.L.: Cryogenic corrosion protection. British Corrosion Journal, Band 31, Heft 3, S. 166, 1996
- 23 Sampson, E.R; M.P. Zwetsloot: Arc spray process for the aircraft and stationary gas turbine industry. Journal of Thermal Spray Technology, Band 6, Heft 2, S. 150-152, 1997
- 24 Sampson, E.: Arc spray works in the sugar and mining industries. Welding Journal, New York, Band 74, Heft 10, S. 35-36, 1995
- 25 Hankirk, M; D.S. Hansen: Metallized coatings for pressure vessel corrosion. Materials Performance, Band 33, Heft 9, S. 31-34, 1994
- 26 Kienböck, M; U. Müller: Anwendungspotentiale für hochenergetische Beschichtungen in der Kraftwerkstechnik. VGB-Kraftwerkstechnik, Band 74, Heft 2, S. 136-138, 1994
- 27 N.N.: DIN EN 657, Thermisches Spritzen: Begriffe, Einteilung. Ausgabe Oktober 1993, Beuth Verlag, Berlin, 1993
- 28 Gramlich, M.: Beitrag zur Simulation des Versagensverhaltens thermisch gespritzter Wärmedämmschichten mittels Finite Elemente Methode. Dissertation Universität Dortmund, Shaker Verlag, ISBN 3-8265-2344-X, 1997
- 29 Nassenstein, K.: Steuer- und Regelungstechnik beim thermischen Spritzen (Plasmaspritzen). VI. Workshop Plasmatechnik, 18./19.06.1998, TU Ilmenau, ISBN 1433-1217, 1998
- 30 Lugscheider, E; F. Ladru; P. Remer; H.J. Sölter: Qualitätssteigerung von thermisch gespritzten Schichten durch den Einsatz der Hochgeschwindigkeitspyrometrie.

- Thermische Spritzkonferenz TS 96, Internationale DVS-Tagung, Essen, D, 06.-08.03.1996, DVS-Band, Band 175, S. 382-386, Düsseldorf, DVS-Verlag, ISBN 3-87155-480-4, 1996
- 31 Zeller, R: Deutsche Dissertation: Untersuchungen zur Qualifizierung des Plasmaspritzens. Dt. Dissertation, S. 1-142, 1997
- 32 Aumüller, B.; A.N. Kirkbride; R. Zeller; H.W. Bergmann: Prozeßidentifikation beim Plasmaspritzen temperatursensitiver Werkstoffe mit Hilfe einer Infrarot-Hochtemperatur-Thermokamera. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Band 27, Heft 2, S. 72-79, 1996
- 33 Moreau. C; P. Gougeon; M. Lamontagne; V. Lacasse; G. Vandreuil; P. Cielo: On-line control of the plasma spraying process by monitoring the temperature, velocity, and trajectory of in-flight particles. 1994 Thermal Spray Ind. Applications, Proc. of 7th Nat., Thermal Spray Conf., Boston, USA, Jun 20-24, 1994, S. 431-437, Materials Park: ASM Int., ISBN 0-87170-509-5, 1994
- 34 Sölter, H.J.: High speed pyrometry for online process control during plasma spraying. Temperatur '92, Tagung, VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik, Düsseldorf, D, 8.-9. Oktober 1992, VDI- Berichte, Band 982, S. 211-222, Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-18-090982-X, 1992
- 35 Sölter, H.J.; U. Müller; E. Lugscheider: High-speed temperature measurement for on-line process control and quality assurance during plasma spraying. I. Identification of important process parameters - measurement principle and potential as an industrial process control inst. Powder Metallurgy International, Band 24, Heft 3, S. 169-175, 1992
- 36 Vattulainen, J.; J. Knuuttila; T. Lehtinen; T. Mantyla, R. Hernberg: In-flight particle concentration and velocity measurements in thermal spraying using a non-intensified ccd camera. Proceedings of the 15<sup>th</sup> thermal spray conference, Nice, 1998
- 37 Puzryakov, A.F.: New developments and prospects of the application of plasma technologies. Welding International, Band 12, Heft 6, S. 484-488, 1998
- 38 Malmberg. S; J. Heberlein; E.-Pfender: DC plasma jet structure and particle velocities during spraying. DVS-Berichte, Band 152, S. 40-44, Düsseldorf: DVS-Verl., ISBN 3- 87155-457-X, 1993
- 39 Ilyuschenko, A.P.; P.A. Vityaz; E.A. Doroshkevich; V.A Okovity; H.F. Falk; Cater, J.A.: System for diagnostic plasma spraying process of coating formation. Thermische Spritzkonferenz TS 96, Internationale DVS-Tagung, Essen, D, 06.-08.03.1996, DVS-Band, Band 175, S. 398-400, Düsseldorf:DVS- Verlag, ISBN 3-87155-480-4, 1996
- 40 Zierhut, J.; K. Landes; C. Waas; D. Kutscher; P. Heinrich; W. Krömmer: In-Situ Diagnostik bei Verfahren des thermischen Beschichtens – Particle Flux Imaging (PFI). United Thermal Spray Conference, Deutscher Verband für Schweißtechnik DVS, Hrsg. E. Lugscheider, P.A. Kammer, S. 340-344, ISBN 3-87155-653-X, 1999
- 41 Drouillard, T.F.: Introduction to acoustic emission technology. Nondestructive testing handbook; v. 5, ISBN 0-9311403-02-2, 1987
- 42 Kaiser, J.: Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, Dissertation, TH München 1950

- 43 Böhme, P.: Beitrag zur Verbesserung der Ortung von Schallemissionsquellen in metallischen Bauteilen. VDI Verlag, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 232, ISBN 3-18-143205-9, 1991
- 44 Engelhardt, A.-H.: Beitrag zur Ortung von Schallemissionsquellen. Dissertation Universität Dortmund, 1984
- 45 Crostack, H.-A.; P. Böhme: Untersuchung der Wasserstoffversprödung an einem Sauer gasbehälter mit Hilfe eines neuen Ortungsverfahrens. DGM-Symposium: Die Schallemission, Bad Nauheim, 1987
- 46 Crostack, H.-A.: Überwachung eines Druckbehälters mit dem Array-Lokalisierungssystem. DGM-Symposium: Die Schallemission, Bad Nauheim, 1978
- 47 Crostack H.-A.: Beitrag zur Reduzierung des Einflusses veränderlicher Schallgeschwindigkeiten bei der Ortung von Schallemissionsquellen. 2. Europäische Tagung für zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 1981
- 48 Deuster, G.; C. Sklarczyk; E. Waschkies: Detection and analysis of defects in reactor components and interpretation of acoustic emission sources. Nuclear Engineering and Design, Band 129, Heft 2, S. 185-190, 1991
- 49 Hoeller, P.; M. Klein; E. Waschkies; G. Deuster: New approach for location of continuously emitting acoustic emission sources by phase-controlled probe arrays. Nuclear Engineering and Design, Band 128, Heft 1, S. 79-82, 1991
- 50 Stiebler, M.: Elektrotechnik. Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 17. Auflage, V14, ISBN 3-540-52381-2, 1990
- 51 Richtlinie DGZfP-SE 1: Zerstörungsfreie Prüfung, Schallemission, Begriffe. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., 1989
- 52 Hansmann, H.: Schallemission von kurzglasfaser-verstärkten Kunststoffen. Simulation von Amplitudenhistogrammen bei hohen Signalaraten. Materialprüfung, Band 33, Heft 10, S. 304-309, 1991
- 53 N.N.: AE diagnostics and quality inspection of welded joints in vessel structures. Technical diagnostics and nondestructive testing, Band 4, Heft 1, S. 48-50
- 54 Mauersberger, G.; R. Eckart; M. Schade; R. v. Schäwen; H.J. Kühn: Signalformen von mit Breitband- und Resonanzaufnehmern registrierten Schallemissionssignalen. 8. Kolloquium Schallemission, Jonsdorf bei Zittau, Wissenschaftliche Berichte der TH Zittau, Heft 24, S. 84-86, 1990
- 55 Vorob, V.A.; V.E. Golovanov; S.I. Golovanova: Analysis of acoustic emission signals in the diagnosis of friction pairs. Russian journal of nondestructive testing, Band 28, Heft 4, S. 169-183, 1992
- 56 Koenig, W.; G. Ketteler: Monitoring of tool wear and breakage in face milling operations. Production Engineering, Muenchen, Band 1, Heft 1, S. 5-8, 1993
- 57 Waschkies, E.: Werkzeugverschleißüberwachung mit Schallemissionsverfahren. Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., DGZfP-Jahrestagung, Trier, 1990
- 58 Waschkies, E.: Verfahren und Vorrichtung zur Überwachung der spanabhebenden Bearbeitung eines Werkstückes. Offenlegungsschrift, Deutsches Patentamt, DE 3829825 A1 vom 15.3.1990

- 59 Builo, S.I.; A.S. Tripalin: Physical and mechanical aspects of accuracy and acoustic emission non-destructive testing method reliability increase. Proceedings 12. World Conference on NDT, Amsterdam, S. 1504-1506, 1989
- 60 Builo, S.I.: On connection of AE-parameters with peculiarities of deformation kinetics and solid microdestruction. "Acoustic emission of materials and constructions", Rostov am Don, RSU, Teil 1, S. 125-132, 1989
- 61 Builo, S.I.: Distortion of AE signal parameters and some peculiarities of reconstruction of emitting sources statistic characteristics. Techn. diagnostic and NDT, Heft 1, S. 15-23, 1989
- 62 Builo, S.I.: Quantitative estimation of reliability of results of AE testing method and diagnostics. Defectoscopy, Band 10, S. 17-25, 1994
- 63 Builo, S.I.: On interpretation of the maximums and reliability of evaluation of the AE amplitude distribution pattern. Techn. diagnostic and NDT, Heft 1, S. 31-39, 1995
- 64 Builo, S.I.; H.-A. Crostack; G. Reuss: Application of acoustic emission amplitude analysis to strength diagnostics and non-destructive testing. Conference on Modern problems of Mechanics, Rostov-on-Don, 1996
- 65 Whittaker, J.W.; J.L. Murphy: Real-time measurement of electron beam weld penetration in uranium by acoustic emission monitoring. 4th World Meeting on Acoustic Emission (AEWG-35), 1st Int. Conf. on Acoustic Emission in Manufacturing, Boston, USA, Columbus: ASNT, S. 447-452, 1991
- 66 Vahaviolos, S.J.: Method and apparatus for the real-time monitoring of a continuous weld using stress wave emission techniques. US Patent 3,986,391, 1976
- 67 Dickhaut, E.; J. Eisenblätter: Acoustic emission measurements during electron beam welding of nickel-base alloys. Journal of Engineering for Power, S. 47-52, 1975
- 68 Crostack, H.-A.; H.-D. Steffens; W. Jüptner: Anwendung der Schallemissionsanalyse zur Überwachung des Elektronenstrahl-Schweißprozesses. Deutscher Verband für Schweißtechnik, DVS-Berichte Band 34 "Strahltechnik VII", 1977
- 69 Crostack, H.-A.: Weld Quality Control of Eb-Weldments by Means of Acoustic Emission. Nuclear Science and Technology Meeting, Rom, Italien, veröffentlicht im gleichnamigen Tagungsband, 1974
- 70 Crostack, H.-A.; B. Wielage: Die Schallemissionsanalyse zur Beurteilung von hochtemperaturgelöteten Verbindungen. DVS-Berichte, Band 92, S. 70-77, 1984
- 71 Bernhardt, W.; C. Petereit: Weichlöten von Kupfer mit Zinn. Schallemission und Kinetik der Phasenbildung. 11. Kolloquium Schallemission. Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, Jena, D, 6. und 7. März 1997. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Band 58, S. 29-38, Berlin: DGZfP, ISBN 3-931381-14-5, 1997
- 72 Kovacecic, R.; R. Mohan, M. Murugesan; A.F. Seybert: On-line monitoring of the electric arc-spraying process based on acoustic signatures. Journal of Engineering Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol 209, S. 369-379, 1995
- 73 Leblanc, L.; C. Moreau, P. Gougou, J. Xi: Long-term stability of plasma spraying: study on the evolution of the in-flight particle state, coating microstructure, voltage and acoustic signatures. United Thermal Spray Conference, Deutscher Verband für Schweißtechnik DVS, Hrsg. E. Lugscheider, P.A. Kammer, S. 306-311, ISBN 3-87155-653-X, 1999

- 74 Haumann, D.: Beschichten komplexer Geometrien am Beispiel von Schraubenroten. Werkstofftechnologische Schriftenreihe, Band 2, Diss. Universität Dortmund, ISBN 3-932775-02-3, 1997
- 75 Steffens, H.-D., M. Dvorak, M. Wewel: Einfluß der Prozeßparameter beim Lichtbogenspritzen. Ein Leitfaden für den Praktiker. DVS-Berichte, Band 130, S. 23-26, Düsseldorf: DVS Verl., ISBN 3-87155-435-9, 1990
- 76 Laux, A: Beitrag zur Ermittlung der Spritzpartikelverteilung beim Lichtbogenspritzen von Stahl. Diplomarbeit an der Universität Dortmund, FB Maschinenbau, 1989
- 77 Steffens, H.-D.; M. Dvorak; M. Wewel: Einfluß der Prozeßparameter beim Lichtbogenspritzen - Ein Leitfaden für den Praktiker. Thermische Spritzkonferenz 1990
- 78 Busse, K.-H.: Das Verhalten von Spritzteilchen beim atmosphärischen Lichtbogenspritzen. Diss. 1989, Universität Dortmund, 1989
- 79 Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. 6. Auflage VEB Fachbuchverlag Leipzig, S.162-167, 1976
- 80 Pfanzagl, J.: Allgemeine Methodenlehre der Statistik II. Höhere Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in Naturwissenschaften, Medizin und Technik. Walter de Gruyter, Berlin, New York, ISBN 3110044749, 1974
- 81 Krautkrämer, J., H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. Auflage, Springer-Verlag 1986.
- 82 Gorman, M.R; S.M. Ziola: Plate waves produced by transverse matrix cracking. Ultrasonics, Band 29, S. 245-251, 1991
- 83 Kirk, I., A. Lewcock: Neural Networks. An introduction. Insight, Band 37, Heft 1, S. 17-20, 1995
- 84 Goser, K., S. Rüping: Motordiagnose mit Neuronalen Netzen und Fuzzy Logik. Lehrstuhl Bauelemente der Elektrotechnik, Universität Dortmund, 1994