

Schlussbericht

Entwicklung eines Vibrationsreinigungsverfahrens für die industrielle, ressourcenschonende Bauteilreinigung (ViReBa)



Projekt im Rahmen des Förderprogramms
„KMU-innovativ: Ressourcen- und Energieeffizienz“
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Laufzeit: 01.08.2008 bis 31.07.2010
Förderkennzeichen: 330862A-C

Autoren:
Dipl.-Ing. Matthias Krebs
Dipl.-Wirt.-Ing. Nils Oeken

Projektkonsortium:



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 330862B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
I. Kurze Darstellung	1
I.1 Aufgabenstellung	1
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
I.4.1 Reinigungsprinzip der Vibrationsreinigung	5
I.4.2 Aufbau der Vibrationsreinigungsanlage.....	6
I.4.3 Potentiale der Vibrationsreinigung.....	9
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II. Eingehende Darstellung	13
II.1 Erzielte Ergebnisse	13
II.1.1 Reinigungsszenarien für die Vibrationsreinigung	13
II.1.1.1 Charakteristik eines Reinigungsszenario	13
II.1.1.2 Einflussfaktoren auf den Reinigungsprozess	25
II.1.1.3 Wertstromanalyse für Reinigungsszenarien.....	27
II.1.1.4 Wertschöpfungsrechner	29
II.1.2 Konstruktionssystematische Untersuchung des Spanwerkzeugs.....	32
II.1.2.1 Modularisierung des Saugwerkzeugsystems	35
II.1.3 Konstruktionssystematische Untersuchung des Schwingungserzeugers	38
II.1.4 Struktur- und Strömungssimulation	41
II.1.4.1 Entwicklung einer Methode zur Erstellung strömungs- optimaler Saugwerkzeuge	41
II.1.4.2 Vorbereitende Schritte zur Strömungssimulation	42
II.1.4.3 Simulation der Strömungsverhältnisse im Luftspalt.....	46
II.1.4.4 Fused-Deposition-Modeling-Verfahren	51
II.1.4.5 Simulationsversuche für eine PWK-Kurbelwelle	51
II.1.4.6 Simulationsversuche für eine LKW-Vorgelegewelle.....	52
II.1.4.7 Optimierung der Absaugvorrichtung	53

II.1.4.8	Fluid-Struktur-Kopplung	56
II.1.4.9	Modalanalyse.....	57
II.1.5	Tests der konstruktiven Änderungen an Versuchsanlagen	57
II.1.6	Untersuchung von Schnellrüstkonzepten	60
II.1.6.1	Anforderungen an ein Schnellrüstkonzept	60
II.1.6.2	Schnittstellenanalyse	62
II.1.6.3	Ansätze für ein Schnellrüstkonzept.....	64
II.1.6.4	Schnellrüstkonzept für die Vibrationsreinigungsanlage	64
II.1.7	Handhabungstechnik	65
II.1.7.1	Handhabungskonzepte für verschiedene Planungsräume	66
II.1.7.2	Anforderungsliste an das Handhabungssystem	68
II.1.7.3	Praxisbeispiel.....	71
II.1.8	Restschmutzanalysen	79
II.1.9	Zusammenfassung.....	81
II.2	Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	83
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	84
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	86
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	88
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	89
Literaturverzeichnis		90
Anhang A		97
Anhang B		103

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I.1: Schematischer Aufbau einer Vibrationsreinigungsanlage	5
Abbildung I.2: Saugstrom an der Bauteiloberfläche ohne und mit Vibration	6
Abbildung I.3: Aufbaubeispiel einer kompletten Maschineneinheit	7
Abbildung I.4: Kombination der verschiedenen Reinigungsprinzipien	9
Abbildung II.1: Morphologischer Kasten eines Reinigungsszenarios.....	14
Abbildung II.2: Integrationsmöglichkeiten der Bauteilreinigung in die Fertigung	18
Abbildung II.3: Einflussgrößen auf den Reinigungsprozess.....	26
Abbildung II.4: Integration von Handhabungsfunktionen in eine Wertstromanalyse	28
Abbildung II.5: Wertschöpfungsrechner.....	31
Abbildung II.6: Spannwerkzeug (Spannzylinder)	33
Abbildung II.7: Spannwerkzeug (Antrieb)	34
Abbildung II.8: Flexibel einstellbares Spannwerkzeug.....	34
Abbildung II.9: Saugwerkzeug mit wellenförmigem Bauteil und Luftspalt	35
Abbildung II.10: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt 8 mm	36
Abbildung II.11: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt 2 mm	37
Abbildung II.12: Schwingungserzeuger (ursprüngliche Version).....	38
Abbildung II.13: Optimierter Schwingungserzeuger.....	39
Abbildung II.14: Kopplung Schwingungserzeuger und Spannsystem	40
Abbildung II.15: Versuchsstand mit Unwuchtmotoren	41
Abbildung II.16: Mustergetriebewelle.....	42
Abbildung II.17: Mustergetriebewelle - vergrößert und vereinfacht.....	43
Abbildung II.18: Saugwerkzeug mit Hohlraum.....	44
Abbildung II.19: Untere Saugwerkzeughälfte mit Absaugöffnungen	44
Abbildung II.20: Baugruppe aus Saugwerkzeughälften und Bauteil im Originalzustand	45
Abbildung II.21: Luftspalt-Volumenkörper.....	45
Abbildung II.22: Luftspalt-Volumenkörper im Teilschnitt	45
Abbildung II.23: Vernetzter Luftspalt-Volumenkörper	46
Abbildung II.24: Definition des Strömungsproblems	47
Abbildung II.25: Verteilung der Wandschubspannungen im Luftspalt	48
Abbildung II.26: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt	48
Abbildung II.27: Optimierung des Saugwerkzeugs (untere Hälfte)	49
Abbildung II.28: Wandschubspannungen nach Einbringung zusätzlicher Saugöffnungen.....	50
Abbildung II.29: Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt nach Einbringung zusätzlicher Saugöffnungen.....	50

Abbildung II.30: Ursprüngliche Absaugvorrichtung (oben).....	54
Abbildung II.31: Neue Absaugvorrichtung (oben)	54
Abbildung II.32: Ursprüngliche Absaugvorrichtung (unten).....	55
Abbildung II.33: Absaugvorrichtung der Versuchsanlage	55
Abbildung II.34: Zu- und Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt	56
Abbildung II.35: Versuchsstand (Saugwerkzeug mit Versuchswelle)	59
Abbildung II.36: Versuchsstand	59
Abbildung II.37 Planungsraum 1 mit beispielhaften Handhabungsfunktionen	67
Abbildung II.38 Planungsraum 2 mit beispielhaften Handhabungsfunktionen	68
Abbildung II.39: Ursprüngliches Umfeld	71
Abbildung II.40: Funktionsplan zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage (ohne zusätzliche Orientierung der Welle)	72
Abbildung II.41: Anlage mit Reinigungsanlage und Ablageförderer	74
Abbildung II.42: Layout der Wellenzuführung mit Reinigungsanlage und Ablageförderer	75
Abbildung II.43: Funktionsplan zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage (mit zusätzlicher Orientierung der Welle)	76
Abbildung II.44: Layout mit zusätzlicher Ausrichtung der Welle.....	77
Abbildung II.45: Ablaufdiagramm Restschmutzanalyse.....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle I.1: Projektpartner	11
Tabelle II.1: Eigenfrequenzen.....	57
Tabelle II.2: Anforderungsliste an ein Handhabungssystem zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage.....	69
Tabelle II.3: Übersicht der Greiferbewegungen	73
Tabelle II.4: Ablaufdiagramm.....	77
Tabelle II.5: Zuwendungsfähige Personalkosten und mit der Pauschale abgegoltene Kosten	83

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
APS	Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme der TU Dortmund
B	Breite
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm ³	Kubikzentimeter
DIN	Deutsches Institut für Normung
€	Euro
EN	Europäische Norm
erf.	erforderlich
etc.	et cetera
e. V.	eingetragener Verein
Fa.	Firma
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FIFO	First In First Out
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FSI	Fluid-Struktur-Kopplung
g	Gramm
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
H	Höhe
Hz	Hertz
i. d. R.	in der Regel
inkl.	inklusive
ISI	Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung
ISO	International Organization for Standardization
KFZ	Kraftfahrzeug

kg	Kilogramm
KMU	Kleine- und Mittelständische Unternehmen
KSS	Kühl-Schmier-Stoffe
kW	Kilowatt
LKW	Lastkraftwagen
m	Meter
max.	maximal
ME	Fachgebiet Maschinenelemente der TU Dortmund
mg	Milligramm
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
µm	Mikrometer
N	Newton
nachgel.	nachgelagert
NIRO	Netzwerk Industrie RuhrOst
Nr.	Nummer
o. ä.	oder ähnlich
OZ	Ordnungszustand
Ra	Mittenrauhwert
Rz	gemittelte Rauhtiefe
RZ	Rüstzeit
s	Sekunde
S.	Seite
Sek.	Sekunde
SMED	Single Minute Exchange of Dies
T	Tiefe
TU	Technische Universität
u.	und
u. a.	unter anderem
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

vgl.	vergleiche
vorgel.	vorgelagert
z. B.	zum Beispiel
ZZ	Zykluszeit

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

In der industriellen Fertigung existiert eine Vielzahl verschiedener Bauteilreinigungsverfahren, die mit unterschiedlichen Wirkprinzipien und Reinigungsmedien arbeiten. Bisher lag der Fokus bei der Auswahl eines Reinigungsverfahrens primär auf der Erfüllung der Reinheitsanforderungen und weniger auf den Anforderungen hinsichtlich Prozessorientierung und Ressourcenschonung. So verfügen die heute industriell eingesetzten Reinigungsanlagen in den meisten Fällen über einen hohen Energie- und Ressourcenbedarf (vgl. Daiber 2010). Zudem sind sie auf Batchbetrieb ausgelegt, so dass große Lose eine Prozessorientierung verhindern und zu hohen Materialbeständen führen (vgl. Takeda 2004, S. 41).

Ein Verfahren, das dabei sowohl unter produktionsorganisatorischen, reinheitstechnischen sowie ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten eine Vielzahl an Vorteilen bietet, ist das von dem Gründer der vibro-tec GmbH aus Unna – Herrn Klaus Döhler – entwickelte und patentierte Verfahren der Vibrationsreinigung. Bei diesem Trockenreinigungsverfahren wird das zu reinigende Bauteil in Schwingung versetzt, wodurch die Adhäsionskräfte der Verschmutzungen, z. B. von Kühl-Schmier-Stoffen (KSS), Emulsion und Partikeln aufgehoben und diese anschließend mit geringem Aufwand abgesaugt werden. Diese energieeffiziente und ressourcenschonende Alternative senkt die Kosten für den Medieneinsatz sowie die nachträgliche Entsorgung und schont zudem die Umwelt.

In diesem Zusammenhang verfolgte das Forschungsvorhaben das Ziel, das ressourcenschonende Vibrationsreinigungsverfahren für den zuverlässigen Einsatz in der industriellen Serienfertigung weiterzuentwickeln.

Im Fokus stand die Erschließung neuer Marktsegmente für die Vibrationsreinigung durch eine weitere Flexibilisierung und prozesssichere Auslegung des Reinigungswerkzeuges, der sog. Saugbacken, mittels Simulationstechniken sowie die Erarbeitung von Handhabungskonzepten, die eine Integration der Vibrationsreinigung in die kontinuierliche Fließfertigung ermöglichen. Hierzu sollten Referenzbeispiele geschaffen werden, die zu einer weiteren Verbreitung der Vibrationsreinigungstechnologie in der Serienfertigung, insbesondere in der Automobil- und Automobilzulieferindustrie, beitragen sollten.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte als interdisziplinäres Verbundprojekt. Unter der Leitung der vibro-tec GmbH waren der Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme (Prof. Dr.-Ing. Deuse), das Fachgebiet Maschinenelemente (Prof. Dr.-Ing. Künne) sowie das Unternehmen Neuhäuser Magnet- und Fördertechnik GmbH an der Bearbeitung beteiligt. Sowohl die Unternehmen vibro-tec GmbH und Neuhäuser Magnet- und Fördertechnik GmbH als auch der Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme sind ordentliche Mitglieder des Netzwerkes Industrie RuhrOst e. V. (NIRO), ein regionaler Zusammenschluss aus 60 Unternehmen aus der Maschinenbau-, Metall- und Elektronikindustrie aus der Region des östlichen Ruhrgebiets. Innerhalb des Netzwerkes konnten zuvor schon viele positive Erfahrungen in der gemeinsamen Bearbeitung von Projekten gesammelt werden. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit im ViReBa-Projekt waren die notwendige Kompetenz und gerätetechnische Ausrüstung für die erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens verfügbar.

Die Wirtschaftskrise im Jahr 2009 hatte Auswirkungen auf den Projektverlauf und erforderte Anpassungen des Projektablaufes (vgl. Abschnitt I.3), wobei die Zielsetzung erreicht werden konnte.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Anbetracht des innovativen Charakters des Forschungsprojektes und der vielfältigen Aktivitäten der einzelnen Projektpartner galt es, einen gut abgestimmten Projektablaufplan zu erstellen, der ein effizientes Vorgehen unterstützt. Daher wurde der Gesamtverlauf des Projektes in Arbeitspakete untergliedert, die sukzessiv aufeinander aufbauen. Zunächst sollten die potentiellen Anwendungsfelder der Vibrationsreinigung genauer untersucht werden und repräsentative Einsatzszenarien bei den assoziierten Industriepartnern ermittelt werden. Im Anschluss daran sollten der Schwingungserzeuger sowie das Spannwerkzeug zur Fixierung der zu reinigenden Bauteile aus konstruktionssystematischer Perspektive untersucht werden, um Verbesserungspotentiale aufzudecken. Ebenfalls galt es den eigentlichen Reinigungsprozess mit dem Abtransport der Verunreinigungen von der Bauteiloberfläche mit Hilfe von Strömungssimulationen zu untersuchen, um hieraus Hinweise zur Optimierung der Saugbacken abzuleiten. Hierzu sollten Bauteilgeometrien von den assoziierten Partnern verwendet werden. Zur Validierung der Ergebnisse der Strömungssimulation sollten im Anschluss die konstruktiven Änderungen in Versuchsanlagen mit realen Bauteilen der assoziierten Partner getestet werden. Zur Integration der Vibrationsreinigungsanlage in Fertigungslinien bedarf es geeigneter Konzepte zum Be- und Entladen. Diese sollten entwickelt und realisiert sowie in der industriellen Praxis getestet werden.

Der Fortschritt des Forschungsprojektes war während der Bearbeitungsphase insbesondere im Jahr 2009 gekennzeichnet durch die Wirtschaftskrise, von der besonders die Unternehmen der Automobilindustrie betroffen waren. Dennoch war es zu Beginn des Jahres 2009 möglich, umfangreiche Reinigungsversuche mit einem Bauteil eines assoziierten Partners durchzuführen. Bei einem weiteren Partner konnten mehrere Bauteile definiert, Reinigungsszenarien aufgenommen sowie Simulationsstudien durchgeführt werden. Jedoch war es nicht möglich Reinigungsversuche durchzuführen und die entwickelten Handhabungslösungen zu testen.

Neben den zuvor vorhandenen assoziierten Partnern konnte das Forschungskonsortium im Laufe des Jahres 2009 weitere Unternehmen gewinnen, bei denen die Vibrationsreinigung bzw. Inline-Reinigungsprozesse eingesetzt wurden. Hier konnten bei zwei Unternehmen Reinigungsszenarien aufgenommen und die Potentiale, die mit einer Integration eines Reinigungsprozesses in die Fließfertigung verbunden sind, bestimmt werden.

Darüber hinaus war es durch die Einrichtung eines Restschmutzanalyselabors an der TU Dortmund zum Ende der Projektlaufzeit möglich, die Sauberkeit von Bauteilen, die mit verschiedenen bereits im Einsatz befindlichen Vibrationsreinigungsanlagen gereinigt wurden, quantitativ zu bestimmen.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Reinigungstechnik hat in den vergangenen Jahren signifikant an Bedeutung gewonnen. Zu erklären ist dies hauptsächlich durch immer filigranere Kanäle in Bauteilen der Automobilzulieferindustrie, die sich bei Schmutzeinwirkung sehr schnell zusetzen und dadurch ausfallen (Rochowicz und Krieg 2004), sowie den immer größer werdenden Einfluss funktioneller Beschichtungen, deren Aufbringen eine vorherige intensive Reinigung erfordert (Haase 2007).

In der Automobilzulieferindustrie, die einen besonders wichtigen Anwendungsbereich der Reinigungstechnik darstellt, wird eine Vielzahl unterschiedlicher Reinigungsverfahren eingesetzt. Den weitaus größten Anteil nehmen dabei die Nassverfahren, zumeist mit wässrigen Medien, in einigen Fällen auch mit Kohlenwasserstoffen oder Chlorkohlenwasserstoffen, ein (vgl. Baumgärtner 2001).

Im Mittelpunkt von Reinigungsprozessen steht eine hohe Prozesssicherheit. Es reicht nicht aus, dass ein überwiegender Teil der Werkstücke den Anforderungen entsprechend gereinigt wird, sondern es muss der anforderungsgerechte Reinigungserfolg jedes Bauteils garantiert sein bzw. kontrolliert werden können.

Die Forderung nach der Prozesssicherheit bedingt bei diesen herkömmlichen Verfahren oft einen besonders hohen Energieverbrauch. Ein typisches Bauteil besteht aus Teilbereichen, die unterschiedlich gut zu reinigen sind. Das Reinigungsverfahren und die eingebrachte chemische sowie physikalische Energie müssen aber so ausgelegt sein, dass selbst die ungünstigsten Stellen den Anforderungen entsprechend gesäubert werden. Vor diesem Hintergrund ist ein beachtlicher Teil der Energie um ein Vielfaches überdosiert. Diese Überdosierung kann jedoch nicht verhindert werden, da eine punkt- oder bereichsgenaue Applikation kaum möglich ist.

Der Reinigungsprozess ist folglich sehr energieintensiv, da in der industriellen Anwendung zu einem großen Anteil Nass- oder Strahlverfahren zum Einsatz kommen (Krieg 2007, S. 23). Energiesparende mechanische Verfahren erreichen bisher nicht die geforderten Reinheiten. Hinzu kommen lange Prozesszeiten, bis die Reinigung vollzogen ist. Dies führt zu der Notwendigkeit, den Prozess „Reinigen“ von den übrigen zu entkoppeln, was die Durchlaufzeiten und die Bestände im Betrieb unnötig erhöht (vgl. Jelinek 1999, S.17; Peterson 1997, S. 4; Hasler 1996). Bei den Anwendern führen diese Nachteile zu einer großen Akzeptanz alternativer Verfahren, die besser in die bestehenden Prozesse eingegliedert werden können, was der Vibrationsreinigung sehr gute Möglichkeiten eröffnet.

Auch die Ultraschallreinigung, als auf den ersten Blick verwandtes Prinzip, bringt wesentliche Nachteile mit sich. Zum Einen ist ein umweltbedenkliches Reinigungsbad erforderlich, welches vor der Entsorgung aufbereitet werden muss. Des Weiteren haftet die Reinigungsflüssigkeit an den Bauteilen, so dass eine Trocknung erforderlich wird.

Die Industrie hat daher erkannt, dass die bisher bevorzugt eingesetzten Verfahren der zentralen Reinigung von Werkstücken aus Gründen der Wirtschaftlichkeit (hoher Energieaufwand, Teiletourismus, Lagerhaltungskosten) sowie starker Umweltbelastung durch effizientere und

flexiblere Verfahren ersetzt werden müssen. Zu diesen Verfahren gehört das innovative Bauteilreinigungsverfahren „Vibrationsreinigung“, dass bei Vorversuchen in industriellen Fertigungslinien sehr gute Reinigungsergebnisse erzielen konnte (Deuse und Döhrer und Droste 2008). Die Vibrationsreinigung ist der Kategorie mechanischer Reinigungsverfahren zuzuordnen, da die Ablösung der Verunreinigung von der Bauteiloberfläche im Wesentlichen durch mechanische Schwingungen und ohne den Einsatz von Zusatzstoffen erreicht wird (vgl. Kloke 2003, S. 46). Darüber hinaus wird bei der Vibrationsreinigung auch kein wässriges Reinigungsmedium verwendet, so dass man in diesem Fall auch von einem Trockenreinigungsverfahren spricht.

I.4.1 Reinigungsprinzip der Vibrationsreinigung

Die Reinigung der Bauteiloberfläche nach dem Vibrationsreinigungsverfahren beruht auf der Erkenntnis, dass sich Partikel und Flüssigkeiten von der Oberfläche eines Bauteils lösen, sobald dieses in Schwingung versetzt wird. Aus diesem Grund werden die zu reinigenden Bauteile in eine Werkstückaufnahme eingespannt, welche die Schwingungen überträgt. Darüber hinaus wird das Bauteil rundherum bzw. partial von Saugbacken umschlossen, welche die Aufgabe besitzen, die gelösten Verunreinigungen abzusaugen (vgl. Abbildung I.1). Die Reinigung der Bauteiloberfläche erfolgt bei der Vibrationstrockenreinigung entweder alleine durch Absaugen oder aber zusätzlich durch Vibration, bei der die Verunreinigungen von der Oberfläche gelöst werden.

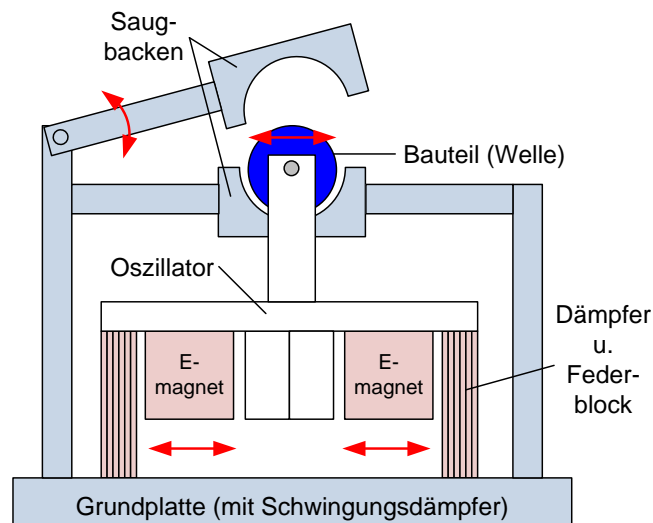


Abbildung I.1: Schematischer Aufbau einer Vibrationsreinigungsanlage (Deuse und Döhrer und Droste 2008)

Für die Erzeugung der Schwingungen, welche über die Werkstückaufnahme in das zu reinigende Bauteil eingeleitet werden, besitzt jede Vibrationsreinigungsanlage zwei Elektromagneten mit je 400 Watt Leistung, die mit einer Frequenz von 35-50 Hz vibrieren und von 0,8 mm starken Federblöcken gedämpft werden. Durch diese Kombination lässt sich eine sinusförmige Schwingung mit einer Amplitude von 1-2 mm realisieren, bei deren Umkehrpunkten die Adhäsionskräfte zwischen den Partikeln sowie flüssigen Verunreinigungen und der Bauteiloberfläche

che aufgehoben werden. Hierdurch entsteht auf der Oberfläche eine Wellenbewegung der Verunreinigungen, welche den Schwingungen folgt. Zusätzlich zu der Vibration wird ein Saugstrom an der Bauteiloberfläche in Richtung der Wellenbewegungen über die Saugbacken eingebracht, mit dem die Verunreinigungen abgesaugt werden können (vgl. Abbildung I.2).

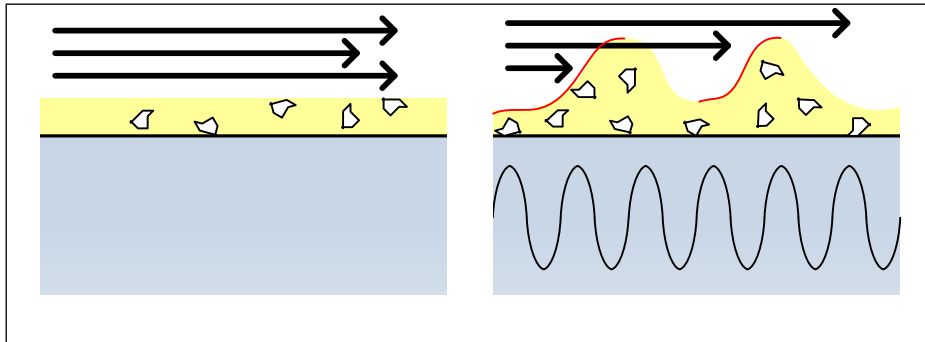


Abbildung I.2: Saugstrom an der Bauteiloberfläche ohne und mit Vibration (Deuse und Döhler und Droste 2008)

Die auf diese Weise von der Bauteiloberfläche entfernten Verunreinigungen, wie Öle und KSS, können nach einer Filterung, bei der sie von Partikeln und Spänen befreit werden, in den Hilfsstoffkreislauf zurückgeführt werden. Diese Rückführung wird möglich, da die Öle und KSS während des Reinigungsprozesses in einer Vibrationsreinigungsanlage nicht in ihrer Konsistenz verändert werden, was einen großen Beitrag zur Ressourcenschonung darstellt.

I.4.2 Aufbau der Vibrationsreinigungsanlage

Die Konstruktion und Gestaltung der Vibrationsreinigungsanlagen ging einher mit der Entwicklung des Reinigungsverfahrens selber. Die Firma vibro-tec GmbH baute zunächst Vibrationsreinigungsanlagen, die nur für eine spezielle Bauteilart, wie z. B. Zahnräder oder Wellen geeignet waren. Im Laufe der Zeit wurde jedoch ein kompaktes und variables Baukastensystem entwickelt, welches an die betrieblichen Gegebenheiten des Kunden angepasst werden kann (vgl. Abbildung I.3).



Abbildung I.3: Aufbaubeispiel einer kompletten Maschineneinheit

Dieses Baukastensystem besteht, wie in Abbildung I.3 zu erkennen ist, aus würfelförmigen Modulen mit je einer Abmessung von 800 x 800 x 800 mm, die entsprechend dem vorhandenem Platzangebot über- oder nebeneinander angeordnet werden können. Jedes Modul besitzt eine eigenständige Aufgabe, die im Folgenden vorgestellt werden.

Sockelmodul

Das Sockelmodul stellt die Basis einer Vibrationsreinigungsanlage dar. Auf diesem Modul, welches als einziges nur eine Höhe von ca. 250 mm besitzt, werden alle anderen Module aufgebaut. Dabei hat das Sockelmodul die Aufgabe, die Schwingungen, die durch die Vibration hervorgerufen werden, zu dämpfen und eine Übertragung auf den Boden zu verhindern. Darüber hinaus kann der Sockel als zusätzlicher Flüssigkeitsbehälter für abgereinigte Verunreinigungen dienen.

Verdichtermodule

In dem Verdichtermodule befindet sich eine Vakuumpumpe, die die Ansaugluft des Luftstroms verdichtet, der bei der Reinigung verwendet wird. Das Gewicht dieses Moduls sowie dessen Anschlussleistung variiert, je nach eingebauter Vakuumpumpe.

Saugmodule

Das Saugmodule besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Zum einen beinhaltet es einen Tank, in dem, bis zu einem definierten Füllstand, alle abgesaugten Verunreinigungen gesammelt werden, bevor sie dem Fertigungskreislauf wieder zugeführt werden. Zum anderen sind

in diesem Modul die gesamte elektrische Steuerung sowie hydraulische und pneumatische Einrichtungen der Vibrationsreinigungsanlage untergebracht.

Reinigungsmodul

Die eigentliche Vibrationsreinigung findet im Reinigungsmodul statt. Innerhalb dieses Moduls befindet sich der in Abbildung I.1 schematisch dargestellte Aufbau mit dem Schwingungserzeuger und der Werkstückaufnahme, sowie die Absaugvorrichtung mit den Saugbacken. Um mit der Vibrationsreinigung ein möglichst großes Bauteilespektrum trocken reinigen zu können, hat die Firma vibro-tec GmbH drei verschiedene Baureihen für das Reinigungsmodul entwickelt.

Mit der Baureihe VT-R lassen sich kleine bis mittelgroße Bauteile, wie z. B. Buchsen, Schrauben, Zahnräder usw., zwischen- und endreinigen. Hierzu werden die Bauteile vereinzelt einem senkrecht rotierenden Kunststoffförderrad mit einfachen, geometrisch angepassten Aussparungen zugeführt. Innerhalb der Aussparungen werden die Teile vibriert und von zwei Seiten abgesaugt bevor sie das Rad sowie das Reinigungsmodul über eine Rutsche verlassen.

Die Baureihe VT-W eignet sich für die Trockenreinigung von Wellen, wie z. B. Kurbelwellen, Getriebewellen oder Ankerwellen. Diese Wellen werden an ihren Stirnseiten eingespannt und innerhalb von formangepassten Saugbacken vibriert und abgesaugt. Alle Prozessparameter, wie die Schwingfrequenz, Schwingamplitude, Reinigungszeit und Saugfunktion, lassen sich entsprechend den Anforderungen frei programmieren. Die Beladung dieser Baureihe lässt sich dabei sowohl manuell, als auch automatisch von fünf Seiten des Moduls realisieren.

Die Baureihe VT-HR ist auf die Trockenreinigung von Rädern, Zahnrädern, Ringen, Ritzeln und ähnlichen Teilen spezialisiert. In Gegensatz zur Baureihe VT-W, bei der die zu reinigenden Teile komplett mit Saugbacken umschlossen werden, wird bei dieser Baureihe das zu reinigende Teil während der Vibration horizontal gedreht und nur segmentweise abgesaugt. In allen übrigen Aspekten, wie Prozessparameter und Beladungsmöglichkeiten, ähnelt diese Baureihe der VT-W Baureihe.

Bei allen Baureihen werden die abgesaugten Öle und KSS nach Abtrennung von Partikeln und Spänen automatisch aus dem Sammelbehälter dem Fertigungskreislauf wieder zugeführt.

Waschmodul

Bei sehr großen Verschmutzungen der Bauteiloberfläche, die nicht durch Vibration und Absaugen zu beseitigen sind, bietet die Firma vibro-tec GmbH ein Waschmodul an, in dem das zu reinigende Bauteil zusätzlich mit dem prozessintegrierten Medium (Öl, KSS) umspült wird. Hierdurch lassen sich noch bessere Reinigungsergebnisse realisieren. Die für den Spülprozess benötigten Pumpen und Filteranlagen sind in dem Waschmodul integriert.

I.4.3 Potentiale der Vibrationsreinigung

Das wesentliche Kriterium für die Beurteilung einer Bauteilreinigungsanlage ist das Erreichen der geforderten Oberflächenreinheit eines Bauteils. Mit einer Vibrationsreinigungsanlage können verschiedene Sauberkeitsstufen erreicht werden, indem verschiedene Reinigungsprinzipien miteinander kombiniert werden und so der Reinigungsaufwand an die Anforderungen bzw. den Reinigungsbedarf angepasst wird. Durch die Anpassung der Reinigungsprinzipien, die von einfachem Absaugen der Verunreinigungen bis zum Spülen mit anschließender Vibration und Absaugen reichen, wird nur die tatsächlich benötigte Energie eingesetzt (vgl. Abbildung I.4).

	Reinigungsprinzip		
	Absaugen	Vibration	Spülen
Partikel mit geringen Adhäsionskräften	●		
Partikel mit mittleren Adhäsionskräften	●	●	
Partikel mit großen Adhäsionskräften	●	●	●

Abbildung I.4: Kombination der verschiedenen Reinigungsprinzipien (in Anlehnung an Deuse und Döhner und Droste 2008)

Versuche im Labor haben belegt, dass mit der in Abbildung I.4 dargestellten, stufenweisen Reinigung unterschiedliche, aber sehr gute Ergebnisse erreicht werden können. So ließ sich von einem mit 1 g Öl verschmutzten Bauteil nur durch absaugen 0,89 g des Öls entfernen. Bei zusätzlicher Vibration betrug der Restanteil des Öls nur noch 0,06 % (Deuse und Döhner und Droste 2008). Einschränkend sei jedoch zu erwähnen, dass mit der Vibrationsreinigung keine vollständige Reinigung der Oberfläche erreicht werden kann, sondern immer ein minimaler Restölfilm auf der Bauteiloberfläche zurück bleibt. Zudem ist es nicht möglich, die Oberfläche eines Bauteils zu entfetten, wodurch dieses Verfahren nicht als Reinigungsschritt vor einem Beschichtungs- oder Lackierprozess eingesetzt werden kann. In Abhängigkeit von den nachgelagerten Prozessen ergibt sich aus diesem Umstand jedoch auch ein weiterer Vorteil der Vibrationsreinigung. So lassen sich die Bauteile durch das Verbleiben des Restölfilms auf der Oberfläche gezielt konservieren und somit vor Korrosion schützen. Neben dieser Möglichkeit und den sehr guten Reinigungsergebnissen bietet die Vibrationsreinigung eine Reihe weiterer Vorteile gegenüber den klassischen Reinigungsverfahren. So führt der Einsatz einer Vibrationsreinigungsanlage zu einer Kostenreduzierung innerhalb der Fertigung, da der Energiebedarf dieser Anlagen sehr gering ist. Zum anderen können die Vibrationsreinigungsanlagen bedarfsorientiert eingesetzt werden, wodurch weitere Energie (bis zu 80 %) gegenüber herkömmlichen Anlagen eingespart werden kann. Neben der Einsparung von Energie entfällt durch die Rückgewinnung der abgereinigten Medien (Öle, KSS) deren Neubeschaffung, wodurch ebenfalls ein wirtschaftlicher Vorteil gegenüber den Reinigungsverfahren entsteht. Aus produktionsorganisatorischer Sicht stellt die einzelne und synchrone Reinigung der Bauteile in

nahezu allen Fertigungszuständen und aus jedem Material einen großen Vorteil dar. Mit einer Vibrationsreinigungsanlage ist es somit möglich, Bauteile einzeln und innerhalb eines Fließfertigungsprozesses mit sehr kurzen Taktzeiten zu reinigen. Dies wird u. a. auch dadurch begünstigt, dass die Vibrationsreinigungsanlage nur eine sehr geringe Aufstellfläche benötigt und somit dezentral in bestehende Fertigungslinien integriert werden kann. Die größten Potentiale gegenüber den klassischen Bauteilreinigungsverfahren bietet die Vibrationsreinigung jedoch in den Bereichen Umwelt- und Ressourcenschonung, weshalb das Verfahren schon mehrfach ausgezeichnet wurde. Durch die Trockenreinigung und Rückgewinnung der flüssigen Verunreinigungen entfällt zum einen deren Entsorgung und zum anderen kann auf den Einsatz von Lösungsmitteln verzichtet werden. Darüber hinaus zeichnet sich die Vibrationsreinigung, wie bereits erläutert, durch einen geringen Energieverbrauch sowie durch eine geringe Geräuschentwicklung aus (vgl. Vollrath 2000, S. 14).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgte eine enge Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen vibro-tec GmbH, Neuhäuser Magnet- und Fördertechnik GmbH und dem Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme sowie dem Fachgebiet Maschinenelemente der TU Dortmund.

Durch diese Kooperation war es möglich, praxis- und umsetzungsorientierte Ergebnisse auf hohem wissenschaftlichem Niveau zu erzielen. Die Arbeitsteilungen in den einzelnen Phasen bzw. Arbeitspaketen und die Schnittstellen in diesem Projekt waren eng aufeinander abgestimmt und genau definiert.

Tabelle I.1: Projektpartner

Projektpartner	Rolle
vibro-tec GmbH, Mühlenstraße 32, 59425 Unna Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Klaus Döhrer Telefon: (02303) 25156-0	Projektleitung, Versuchsplanung / -anlagen
Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme (APS) Leonhard-Euler-Straße 5, 44227 Dortmund Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse Telefon: (0231) 755-2651	Rüstkonzpte / Integration in Fertigungslinien
Fachgebiet Maschinenelemente (ME) Leonhard-Euler-Straße 5, 44227 Dortmund Ansprechpartner: Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne Telefon: (0231) 755-2602	Konstruktionstechnische Ausarbeitung
Neuhäuser Magnet- und Fördertechnik GmbH, Scharnhorststraße 11-16, 44532 Lünen Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Hans-Peter Bienemann Telefon: (02306) 949-214	Handhabungssysteme / Versuchsanlagen

Vibro-tec GmbH

Das Maschinenbauunternehmen vibro-tec GmbH in Unna entwickelt, baut und vertreibt Anlagen zur Zwischen- und Endreinigung von industriell hergestellten Fertigungsteilen. Die Firma wurde 1996 von dem Entwickler der patentierten Vibrationsreinigung, Dipl.-Ing. Klaus Döhrer, gegründet. Im Rahmen von Versuchsstudien kam das Vibrationsreinigungsverfahren im Vor-

feld bereits in Fertigungslinien in der Automobilzulieferindustrie und dem allgemeinen Maschinenbau zum Einsatz.

Im Forschungsprojekt übernahm vibro-tec GmbH die Projektleitung. Für die Versuchsplanung und die maschinentechnische Ausrüstung war das Unternehmen ebenfalls verantwortlich.

TU Dortmund, Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme

Der Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme befasst sich schwerpunktmäßig mit den Aufgabenstellungen des Industrial Engineering. Im Fokus stehen hier die Planung, Gestaltung und unternehmensspezifische Umsetzung von ganzheitlichen Produktionssystemen nach den Prinzipien von Lean Production. Neben erfolgreichen Forschungsarbeiten hat der Lehrstuhl umfangreiche Erfahrungen bei der Einführung und nachhaltigen Betreuung von ganzheitlichen Produktionssystemen in der industriellen Praxis.

Die wissenschaftliche und praxisorientierte Erarbeitung von Schnellrüstkonzepten und die Integration in Fertigungslinien hinsichtlich Prozessorientierung fiel in den Verantwortungsbereich des Lehrstuhls.

TU Dortmund, Fachgebiet Maschinenelemente

Das Fachgebiet Maschinenelemente beschäftigt sich bereits seit mehreren Jahren mit der Problemstellung der Bauteilreinigung. Im Rahmen dreier vom BMWi geförderter Projekte (Wi 258.77, Wi 258.90 und VII C2 – 00 30 60 / 34) entstand dabei das internetbasierte Fachinformationssystem "www.bauteilreinigung.de", welches KMU des produzierenden Gewerbes bei der Auswahl geeigneter Reinigungsverfahren, Reinigungsmittel und Reinigungsanlagen unterstützt. Dieses Fachinformationssystem gibt dem Anwender einen guten Überblick über die industrielle Reinigungstechnik und erlaubt eine gezielte Vermittlung von Kontakten zu geeigneten Fremdanbietern. Basierend auf Erfahrungen im Umfeld der struktur- und strömungstechnischen Simulation bestand die Aufgabe des Fachgebietes in der konstruktionstechnischen Ausarbeitung der Vibrationsreinigungsanlage.

Neuhäuser Magnet- und Fördertechnik GmbH, Lünen (KMU)

Das Unternehmen Neuhäuser am Standort Lünen wurde 1965 zunächst als reiner Bergbauzulieferer gegründet. Inzwischen gliedert sich die Neuhäusergruppe in Neuhäuser GmbH (Bergbauprodukte), Neuhäuser Magnet und Fördertechnik (Maschinenbau) und Neuhäuser WINDTEC GmbH (Windkraftanlagen). Der Schwerpunkt des Produktionsprogramms liegt auf Handlingsystemen, Fördersystemen und Separiersystemen.

Die Entwicklung und das Testen von potentiellen Handhabungs- und Fördersystemen, um eine verbesserte Integrierbarkeit des Vibrationsreinigungsprozesses in ein bestehendes Arbeitssystem zu gewährleisten, gehörten zum Aufgabenfeld des Unternehmens.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Erzielte Ergebnisse

Zur Weiterentwicklung des Vibrationsreinigungsverfahrens ist das Projekt in mehrere Teilprojekte unterteilt. Zunächst galt es typische Reinigungsszenarien für die Vibrationsreinigung zu definieren, bei denen die Potentiale des Verfahrens optimal ausgeschöpft werden können (vgl. Abschnitt II.1.1). Anschließend wurden der Schwingungserzeuger sowie das Spannwerkzeug mit Hilfe von Methoden der Konstruktionssystematik untersucht, um eine verbesserte Ablösung der Verunreinigungen zu erzielen (vgl. Abschnitt II.1.2 bis II.1.5). Für den Einsatz der Vibrationsreinigung in Fertigungslinien mit Teilen unterschiedlicher Geometrie wurden Schnellrüstkonzepte entwickelt, um den rüstzeitbedingten Maschinenstillstand zu minimieren (Abschnitt II.1.6). Zudem bedarf es für die Integration angepasste Handhabungslösungen, die es ebenfalls zu entwickeln galt (vgl. Abschnitt II.1.7). Abschließend wurden exemplarisch Restschmutzanalysen durchgeführt um die Reinigungsergebnisse, die mit der Vibrationsreinigung zu erreichen sind, quantitativ zu bestimmen. In den nachfolgenden Abschnitten sind die Lösungsansätze für die einzelnen Teilprobleme dargestellt.

II.1.1 Reinigungsszenarien für die Vibrationsreinigung

Zur zielführenden Weiterentwicklung der Vibrationsreinigung galt es zunächst, typische Anwendungsfelder mit repräsentativen Rahmenbedingungen zu analysieren um hieraus typische Reinigungsszenarien für den Einsatz der Vibrationsreinigung zu definieren. Im Besonderen galt es, auf die alternative Prozessgestaltung bei der Vor-, Zwischen- und Endreinigung von Bauteilen einzugehen, da die Vibrationsreinigung technologisch und konstruktiv grundsätzlich unterschiedliche Prozessabläufe erlaubt. Bisher bestanden Reinigungsszenarien in der Regel aus der isolierten Betrachtung des eigentlichen Reinigungsprozesses zusammen mit den zu erfüllenden Anforderungen. Eine prozessorientierte Betrachtung, bei der neben dem Reinigungsprozess auch die Entstehung der Verunreinigung und die erforderliche Sauberkeit für die nachfolgenden Prozesse sowie weitere Rahmenbedingungen mit berücksichtigt werden, findet nur in wenigen Fällen statt (vgl. VDA 19.2, S. 12; Schulz 2006a). Die Gründe hierfür liegen in der zumeist zentralen bzw. dezentralen Organisation der Reinigungsprozesse und den damit verbundenen vielzähligen Schnittstellen zu unterschiedlichen Fertigungsbereichen. Dabei können auch innovative Reinigungsverfahren und -techniken nur dann effektiv und praxisorientiert eingesetzt werden, wenn eine prozessorientierte Integrierbarkeit gewährleistet wird (Hornemann und Modrich und Schmierer 1999).

II.1.1.1 Charakteristik eines Reinigungsszenario

Die Vielzahl verschiedener und sich gegenseitig beeinflussender Faktoren erschwert eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Reinigungsszenarien aus der prozessorientierten Perspektive. Um die Prozesse dennoch charakterisieren und gegeneinander in wichtigen Kriterien abgrenzen zu können, wurde ein morphologischer Kasten zu den qualitativen Kategorien Wertstrom, Teil und Reinigung entwickelt (vgl. Abbildung II.1). Zur Kategorie Wertstrom werden die

Merkmale, die den untersuchten Produktionsbereich mit der dortigen Fertigungsart und -prinzip beschreiben, zugeordnet. Darüber hinaus wird der Prozess anhand der Anzahl, Lage und Organisation der Reinigungsprozesse innerhalb eines Wertstroms gekennzeichnet, sowie die dort vorhandene Handhabung der Bauteile differenziert. Für die weitere Charakterisierung des Reinigungsszenarios sind im Hinblick auf die Bauteile lediglich die Anzahl der Varianten und der Durchsatz von Bedeutung, da diese sich unmittelbar auf die Organisation auswirken. Zur Beschreibung des Reinigungsprozesses werden die Eingangsgrößen Verschmutzungsart und -menge sowie das angestrebte Reinigungsergebnis und die Position der Bauteile während des Reinigungsprozesses berücksichtigt.

Merkmal		Ausprägung								
Wertstrom	Untersuchungsgegenstand	Einzelner Prozess		Wertstrom		Fertigungsbereich		Werk		
	Produktionsbereich	Fertigung			Fertigung u. Montage			Montage		
	Fertigungsart	Einmalfertigung		Wiederhol- fertigung	Sortenfertigung		Serienfertigung		Massenfertigung	
	Fertigungsprinzip	Baustellenprinzip		Werkstattprinzip		Inselprinzip		Fließprinzip		
	Lage im Wertstrom	Vorreinigung			Zwischenreinigung			Endreinigung		
	Organisation	Inline			Dezentral			Zentral		
	Anzahl Reinigungsprozesse	Ein Reinigungsprozess		Zwei Reinigungsprozesse		Drei Reinigungsprozesse		> Drei Reinigungsprozesse		
	Handhabung im Wertstrom	Manuell		Mechanisiert		Halbautomatisiert		Automatisiert		
Teil	Varianz der Teile	Ein Bauteil		Eine Produktfamilie		Mehrere Produktfamilien		Ganzes Teilespektrum		
	Durchsatz	Teil/Takt		Teil/≠Takt		Batch/ΣTakt		Batch/≠ΣTakt		
Reinigung	Art der Verschmutzung	Metallspäne		KSS	Öle / Fette		Ziehmittel	Polier- und Schleifmittel	Rost, Zunder und Sonstige	
	Schmutzmenge	Bauteile stehen in Öl / Schmutz		Bauteile sind stark verschmutzt		Bauteile sind leicht verschmutzt		Bauteile sind nach Augenschein sauber		
	Reinigungsgüte	Grob		Reinigung		Fein		Feinst		
	Position der Teile	Batch-Reinigung Schüttgut		Batch-Reinigung Unterschiedliche Teile einzeln aufgelegt		Batch-Reinigung Gleiche Teile einzeln aufgelegt		Einzelteilreinigung		

Abbildung II.1: Morphologischer Kasten eines Reinigungsszenarios

Mit Hilfe dieser Einteilung ist es zum einen möglich, einen schnellen Überblick über ein Szenario zu erlangen und zum anderen unterschiedliche Reinigungsszenarios zu vergleichen. Zudem können anhand der Kriterien typische Anwendungsszenarios für die Vibrationsreinigung definiert und die Eignung der Vibrationsreinigungsanlage analysiert sowie qualitativ bewertet werden.

Untersuchungsgegenstand

Unter dem Kriterium Untersuchungsgegenstand wurde das Betrachtungsfeld definiert, das im Hinblick auf die Reinigungsprozesse untersucht wird. Hierbei wird zwischen vier verschiedenen Bereichen unterschieden, die eine unterschiedliche Ausdehnung innerhalb einer Produktionsstätte besitzen. Dieses Kriterium hängt dabei sehr stark mit den weiteren Elementen der Kategorie Wertstrom zusammen, insbesondere mit der Organisation der Reinigung. Im Falle zentral organisierter Reinigungsprozesse dehnt sich der Betrachtungsbereich meist auf das gesamte Werk aus, da Bauteile aus unterschiedlichen Bereichen in einer bzw. mehreren zentral angeordneten Reinigungsanlagen gereinigt werden. Innerhalb eines Werkes kann der Betrachtungsbereich schließlich weiter eingeschränkt werden, sodass nur ausgewählte Fertigungsbereiche oder einzelne Wertströme untersucht werden, bei denen die Reinigungsprozesse dezentral bzw. inline organisiert werden. Bei diesen drei Untersuchungsbereichen ist es möglich, den Reinigungsprozess in Abhängigkeit von den vor- und nachgelagerten Prozessen prozessorientiert zu betrachten. Dies ist bei der letzten Kategorie, der Betrachtung des eigentlichen Reinigungsprozesses, nicht möglich, da hierbei die Rahmenbedingungen als feste Eingangsgrößen angesehen werden.

Der Untersuchungsgegenstand ist zunächst unabhängig von einer bestimmten Reinigungstechnologie und somit auch unabhängig von der Vibrationsreinigung zu sehen. Dieser gibt vielmehr nur die vorhandenen Grenzen und die Möglichkeiten der Einflussnahme vor. So kann z. B. eine alternative Prozessgestaltung, die mit der Vibrationsreinigung prinzipiell möglich ist, nur bei der Betrachtung des gesamten Wertstroms bzw. eines Fertigungsbereiches realisiert werden.

Produktionsbereich

Mit dem Kriterium Produktionsbereich wird beschrieben, welcher organisatorischen Einheit die Reinigungsprozesse zugeordnet sind. Im klassischen Fall sind Reinigungsprozesse in der Fertigung nach der mechanischen Bearbeitung erforderlich, um die dort entstandenen Verunreinigungen zu entfernen. Hierzu gehören i. d. R. Späne, Öle, Kühl-Schmier-Stoffe (KSS), etc., die bei einer weiteren Bearbeitung nicht erwünscht sind oder sich störend auswirken.

Neben den Reinigungsprozessen in der Fertigung sind diese ggf. auch im Bereich der Montage erforderlich. Bei Montageoperationen können ebenfalls Verunreinigungen entstehen, z. B. durch das Lösen von Graten, während Verschraubungen, die anschließend als partikuläre Verunreinigungen die Funktion des Bauteils beeinträchtigen können (vgl. VDA 19.2, S. 18). Darüber hinaus können Verunreinigungen in Form von Umgebungsschmutz bei der Montage eingebracht werden, die ebenfalls nicht erwünscht sind.

Die Vibrationsreinigungsanlagen können prinzipiell sowohl in der Fertigung als auch in der Montage eingesetzt werden. Der Schwerpunkt liegt jedoch auf der Fertigung, da die Vibrationsreinigung durch die Rückgewinnung der Fertigungshilfsstoffe hier ihr größtes ökologisches Potential erreichen kann.

Fertigungsart

Die industrielle Fertigung lässt sich anhand der Wiederholhäufigkeit und gefertigten Stückzahl pro Zeitintervall charakterisieren (Schuh 2006, S. 129). Dabei lässt sich die Fertigungsart in Einzel- und in Mehrfachfertigung unterteilen (Wiendahl 2005, S. 40). Charakteristisch für die Einzelfertigung ist, dass die Leistungserbringung für jedes Bauteil einzeln erfolgt. Diese Fertigungsart kann weiter in Einmal- und Wiederholfertigung aufgeteilt werden. Bei der Wiederholfertigung wird dasselbe Objekt zu einem späteren Zeitpunkt erneut hergestellt. Bei einer Mehrfachfertigung werden gleichartige Güter nacheinander gefertigt. Eine weitere Unterteilung kann anhand des Grades der Ähnlichkeit und der Stückzahl der Güter getroffen werden. Bei einer Sortenfertigung werden verschiedene Varianten gleichartiger Produkte, die sich hinsichtlich ihrer Fertigungsprozesse nur geringfügig unterscheiden, nacheinander gefertigt. Mit steigender Stückzahl nimmt schließlich die Homogenität zwischen den unterschiedlichen Produkten zu. Dabei wird zwischen Serien- und Massenfertigung unterschieden.

Die Fertigungsart hat einen großen Einfluss auf die Eignung der Vibrationsreinigung in Wertströmen. Insbesondere die Reinigung der Bauteile in geometrisch angepassten Saugbacken stellt eine Restriktion für die Flexibilität der Vibrationsreinigungsanlagen hinsichtlich verschiedener Bauteile dar. So bedeutet eine neue Bauteilvariante unmittelbar ein neues, angepasstes Paar Saugbacken. Der Ansatz, Produkte anhand ihrer geometrischen Ähnlichkeit zu gruppieren, die mit einem Saugbackenpaar gereinigt werden können, wurde nach den ersten Simulationsversuchen verworfen, da sich herausgestellt hat, dass der Saugspalt einen sehr eng tolerierten Grenzwert nicht überschreiten darf um ein akzeptables Reinigungsergebnis zu erhalten (vgl. Abschnitt II.1.2.1). Somit eignen sich Vibrationsreinigungsanlagen in erster Linie für die Fertigungsarten der Serien- und Massenfertigung, bei denen hohe Stückzahlen geometrisch gleicher Bauteile gefertigt werden. Um einen wirtschaftlichen Einsatz in der Sortenfertigung dennoch zu ermöglichen, wurde zudem ein Schnellrüstkonzept entwickelt (vgl. Abschnitt II.1.6).

Fertigungsprinzip

Die Fertigungsart ist ausschlaggebend für die Wahl des Fertigungsprinzips. Die unterschiedlichen Fertigungsprinzipien lassen sich anhand der räumlichen und organisatorischen Struktur des Arbeitssystems (Westkämper 2006, S. 198) und der Art der Transportbeziehungen charakterisieren. Die räumliche Anordnung der Bauteilreinigungsanlagen innerhalb der Fertigung hat dabei Auswirkungen auf verschiedene produktionstechnische Kenngrößen wie Durchlaufzeit, Umlaufbestände und Flexibilität.

Bei dem Baustellenprinzip ist das zu fertigende bzw. zu montierende Objekt ortsfest und die verschiedenen Betriebsmittel und Arbeitskräfte müssen dem Objekt zugeführt werden. Dieses Prinzip bietet sich vor Allem bei großen und schweren Objekten an. Charakteristisch ist dieses Fertigungsprinzip insbesondere für die Einzelfertigung. Die Werkstattfertigung hingegen eignet sich auch für die Mehrfachfertigung. Hierbei werden die verschiedenen Betriebsmittel nach Art der Verrichtung räumlich getrennt angeordnet, sodass ein zu bearbeitendes Objekt die ver-

schiedenen Abteilungen nacheinander durchläuft. Um Durchlaufzeiten zu reduzieren, wurde das Inselprinzip entwickelt, das eine Mischform zwischen Werkstatt- und Fließfertigung darstellt. Dabei werden Betriebsmittel für verschiedene Verrichtungen räumlich zusammengefasst um ähnliche Teile, im Hinblick auf ihre Bearbeitungscharakteristika, möglichst komplett bearbeiten zu können. Dieses Prinzip eignet sich vornehmlich für Produkte im mittleren Stückzahlenspektrum. Zur Bearbeitung größerer Stückzahlen wird das Fließprinzip angewandt, bei dem die Betriebsmittel nach der Bearbeitungsreihenfolge angeordnet werden, wodurch sich ein starr getakteter und gerichteter Materialfluss ergibt. Dieses Prinzip ist nur für große Stückzahlen mit einer hohen Wiederholhäufigkeit geeignet (Wiendahl 2005, S. 40).

Durch ihre geringe Aufstellfläche sowie der Einzelteil-Reinigung mit kurzen Zykluszeiten eignet sich der Einsatz der Vibrationsreinigungsanlage besonders für die Stellen, an denen ein Teil unmittelbar nach der Bearbeitung in dem vorgelagerten Prozessschritt an die Vibrationsreinigung und anschließend an den nachfolgenden weitergegeben und somit ein kontinuierlicher Materialfluss erreicht wird. Die geringe Aufstellfläche und kurzen Zykluszeiten stellen damit ein großes Potential zur Reduzierung von Durchlaufzeiten und zur Minimierung von Beständen im Wertstrom dar (Deuse und Döhrer und Droste 2008). Aus diesem Grund sollte der Einsatz an den Stellen vorgesehen werden, an denen ein Aufstellen der Vibrationsreinigungsanlage in unmittelbar räumlicher Nähe zu den vor- und nachgelagerten Prozessen möglich ist. Dies kann in erster Linie bei dem Fertigungsprinzip der Fließfertigung realisiert werden. Aber auch bei Fertigungsinseln, bei denen ausreichend große Lose gefertigt werden, kann die Vibrationsreinigungsanlage integriert werden.

Lage im Wertstrom

Die Lage des Reinigungsprozesses im Wertstrom beschreibt den Umfang und die Art des Reinigungsprozesses. Bei diesem Kriterium wird prinzipiell zwischen Vor- bzw. Eingangs-, Zwischen- und Endreinigung differenziert (Schmidt 1996, S. 14f.). Bei Vorreinigungsprozessen werden hauptsächlich Verschmutzungen von Zukauf- oder Lagerteilen entfernt, die sich negativ auf die weiteren Prozessschritte auswirken können. Hierzu gehören z. B. Korrosionsschutzmittel oder Rost und Zunder. Im Gegensatz zur Vorreinigung werden bei der Zwischenreinigung Verunreinigungen von der Bauteiloberfläche entfernt, die durch vorgelagerte Prozessschritte erzeugt worden sind, um den nachfolgenden Prozessschritten ein Bauteil mit einem definierten Reinheitszustand zu Verfügung zu stellen. Diese Art der Reinigung ist vor allem in den Fällen erforderlich, bei denen die nachfolgenden Prozesse eine Prozesssicherheit nur gewährleisten können, sofern die Bauteile definierte Restschmutzwerte nicht übersteigen. Endreinigungsprozesse sind häufig unmittelbar vor dem Versand der Bauteile zum Kunden vorzufinden. Hierbei müssen die Reinheitsanforderungen der Kunden erfüllt werden, sodass diese die Bauteile in dem von ihnen definierten Zustand erhalten. Dabei ist zudem zu beachten, dass für den Transport ggf. ein geeigneter Korrosionsschutz auf die Bauteile aufgetragen wird.

Anhand der Lage eines Reinigungsprozesses im Wertstrom kann keine pauschale Aussage getroffen werden, ob die Vibrationsreinigung für diesen Reinigungsprozess geeignet ist oder nicht. Vielmehr ist von Bedeutung, welche Bauteilsauberkeit in diesem Prozess erreicht werden muss, wobei diese in Abhängigkeit von Branche und Bauteil sehr unterschiedlich sein kann. So kann die Vibrationsreinigung zum Beispiel als Endreinigungsprozess in Wertströmen eingesetzt werden, bei denen ein Restschmutz von Partikeln kleiner 500 µm sowie ein Restölfilm toleriert werden kann. Sofern höhere Restschmutzwerte gefordert werden, eignet sich das reine Vibrationstrockenreinigungsverfahren nicht mehr und muss mit einem Nassreinigungsverfahren kombiniert werden.

Organisation

Die Teilereinigung kann innerhalb eines Produktionsbereiches auf drei verschiedene Weisen organisiert werden. Gliederungskriterien sind dabei die Lage innerhalb der Produktion sowie die logistische Verkettung zwischen den Reinigungs- und Produktionsprozessen. Somit wird zwischen zentraler-, dezentraler- und inline Organisation differenziert (Deuse und Döhrer und Droste 2008).

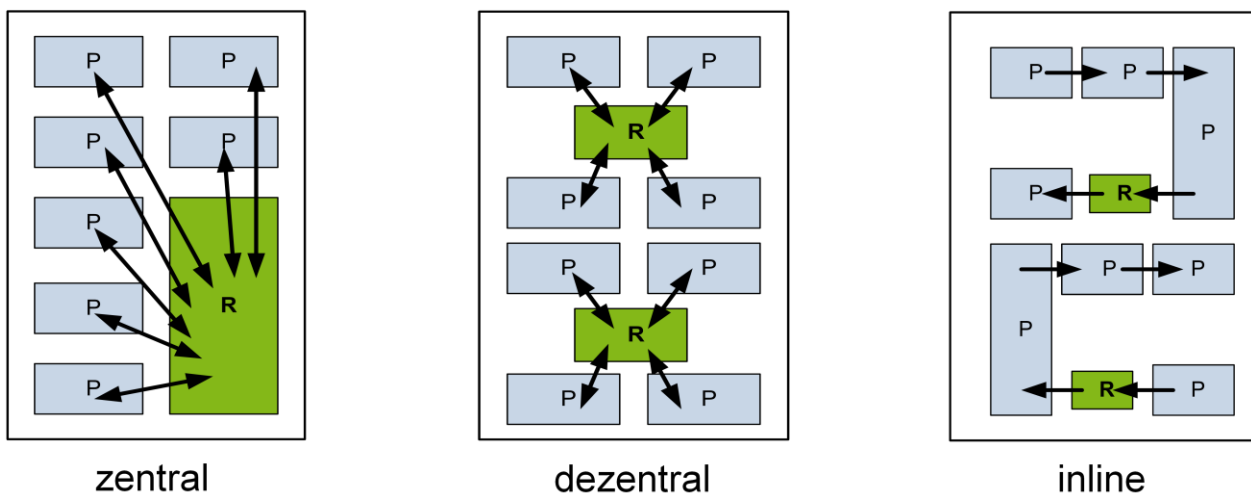


Abbildung II.2: Integrationsmöglichkeiten der Bauteilreinigung in die Fertigung (Deuse und Döhrer und Droste 2008)

Bei der zentralen Reinigung wird der Reinigungsprozess an einer zentralen Stelle der Produktion mit dem Ziel angeordnet, alle Produkte, bei denen eine Reinigung erforderlich ist, in dieser Reinigungsanlage reinigen zu lassen. Dies bietet den Vorteil, dass sich durch die gemeinsame Nutzung positive Skaleneffekte ergeben. Zudem weisen zentral organisierte Anlagen i. d. R. eine hohe Prozesssicherheit und Anlagenverfügbarkeit auf (Krebs und Deuse 2010), wodurch gute Reinigungsergebnisse bei einer hohen Verfügbarkeit erzielt werden. Allerdings ist die Reinigung in vielen Fällen nicht bedarfsorientiert, da der Reinigungsaufwand an die maximale Verschmutzung einer Produktgruppe bzw. an die minimalen Restschmutzmengen angepasst ist. Zusätzlich werden die Teile in Waschbehältern gereinigt, bei denen die Wirkung des Reinigungsmediums von außen nach innen abnimmt. Diese Zusammenfassung zu sog. Batches

bedeutet, dass viele Bauteile zu umfangreich gereinigt werden, andere hingegen gerade ausreichend. Zudem wird dabei auch sehr viel Energie und Reinigungsmedium ineffizient eingesetzt. Wenn diese zentral organisierten Anlagen ausfallen, bilden sie einen Engpass für die gesamte Fertigung, sofern keine anderen Maschinen vorhanden sind, auf die die Werkstücke verteilt werden könnten. Neben der Engpasssituation verursacht eine zentral organisierte Reinigungsanlage eine Erhöhung der Umlaufbestände und somit eine längere Durchlaufzeit (Hiltl 2002). Darüber resultiert aus diesem Organisationsprinzip ein hoher Flächenbedarf für die Anlage und für die Pufferflächen zur Bereitstellung der zu reinigenden Bauteile. Des Weiteren bedeutet eine zentral organisierte Anlage einen hohen Investitionsaufwand bei der Beschaffung. Die großen Losgrößen während des Reinigungsprozesses widersprechen dem Ziel eines kontinuierlichen Flusses. In Verbindung mit dem nicht gerichteten Materialfluss ergeben sich zusätzliche Belastungen für die Produktionslogistik.

Dieser Transportaufwand kann durch eine dezentrale Organisation der Reinigungsprozesse verringert werden. Bei diesem Konzept wird in jeden Fertigungsbereich eine Reinigungsanlage platziert, in der alle zu reinigenden Produkte dieses Fertigungsbereichs gereinigt werden. Dies bietet gegenüber der zentralen Reinigung den Vorteil, dass weniger Fläche gebunden wird. Auf Grund der größeren Anzahl an Reinigungsanlagen in der Produktion verbessert sich auch die Engpasssituation im Falle eines Anlagenausfalls. Dennoch werden auch bei diesem Prinzip große Lose gebildet, um die Auslastung der einzelnen Reinigungsanlagen zu optimieren. Der weiterhin nicht gerichtete Materialfluss stellt ein weiteres Defizit dieses Konzeptes im Hinblick auf eine verschwendungsarme Produktion dar (vgl. Deuse und Stausberg und Wischniewski 2007).

Ein kontinuierlicher und gerichteter Materialfluss kann hingegen mit der dritten Organisationsform, der Inline-Organisation der Reinigungsprozesse, bei der kompakte Reinigungsmaschinen unmittelbar in die Fertigungslinie integriert werden, erreicht werden. Dadurch können sowohl die Transport- und Durchlaufzeiten minimiert, als auch eine größtmögliche Prozessorientierung und Transparenz geschaffen werden (Rochowicz und Krieg 2004). Dieses Konzept erweist sich als robust bei Ausfall einzelner Anlagen, da in diesem Fall nur ein Fertigungsbereich betroffen ist. Durch die große Gesamtanzahl an integrierten Reinigungsanlagen steigt jedoch auch der Aufwand für deren Installation und Wartung.

Durch ihre kompakte Bauform eignet sich die Vibrationsreinigungsanlage sehr gut für die unmittelbare Integration in eine Fertigungslinie in Form einer Inline-Reinigung. Darüber hinaus wird bei der Vibrationsreinigung jedes Teil einzeln in den speziell angepassten Saugbacken gereinigt. Dadurch kann der Reinigungsaufwand an die vorhandene Verschmutzung sowie an die angestrebte Sauberkeit angepasst werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass nur die tatsächlich benötigte Energie für den Reinigungsprozess benötigt wird, und keine zu umfangreiche Reinigung wie im Falle der zentral und dezentral organisierten Reinigungsprozesse erfolgt.

Anzahl der Reinigungsprozesse

Das Kriterium Anzahl der Reinigungsprozesse wurde gewählt, um die Bedeutung der Reinigung innerhalb eines Wertstroms zu beschreiben. Da die Anzahl und Gewichtung der Einzelschritte unterschiedlich ist, stellen diese keine exakte Größe dar, sondern geben vielmehr eine Tendenz für die Bedeutung der Reinigung an. Üblicherweise steigt mit zunehmender Anzahl an Stationen der Aufwand für die Reinigung und somit in vielen Fällen die Kosten- und Durchlaufzeitanteile, die durch die Reinigungsprozesse verursacht werden (vgl. Krieg 2007, S. 5f.). Die Aufteilung in einen, zwei, drei oder mehr Reinigungsprozesse pro Wertstrom erfolgte anhand repräsentativer industrieller Wertströme (vgl. Krieg 2007, S. 31).

Für die Vibrationsreinigung ist es zunächst nicht von Bedeutung wie viele Reinigungsprozesse in einem Wertstrom vorhanden sind, da Vibrationsreinigungsanlagen prinzipiell auch mehrfach in eine Fertigungslinie integriert werden und die Saugbacken sowie das Reinigungsprogramm an die eingehenden Verunreinigungen und die erforderliche Sauberkeit angepasst werden können.

Handhabung im Wertstrom

Mit dem Kriterium Handhabung im Wertstrom wird der Automatisierungsgrad bei der Handhabung der Werkstücke im betrachteten Produktionsbereich beschrieben. Der Automatisierungsgrad hängt im Wesentlichen von der Produktionsmenge, der Variantenvielfalt und der gewünschten Flexibilität ab (Becker und Eipl 2007). Prinzipiell kann eine Handhabungsaufgabe durch die vier Handhabungsklassen vollständig automatisiert, teilautomatisiert, mechanisiert und manuell realisiert werden (Haller 1999, S. 12), wobei die einzelnen Klassen darüber hinaus unterschiedliche technologische Ausprägungen besitzen können.

Zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage mit Bauteilen können all diese Klassen herangezogen werden. Die Auswahl einer Klasse und die detaillierte Ausgestaltung der Handhabungslösung müssen jedoch individuell für den jeweiligen Anwendungsfall erfolgen, da hierbei die unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen sind. Das Reinigungsmodul der Vibrationsreinigungsanlage ist dabei prinzipiell von fünf Seiten zugänglich (vgl. Abbildung I.3), wodurch sich vielfältige Möglichkeiten für die Be- und Entladung ergeben.

Varianz der Teile

Die Varianz der Teile hat sowohl einen großen Einfluss auf die Wahl der Fertigungsart als auch auf die Gestaltung des Reinigungsprozesses, weshalb eine eigene Kategorie definiert wurde. Allgemein ist Varianz als Heterogenität innerhalb einer Gruppe von Teilen zu verstehen (vgl. Henze 2010 S. 156). Prinzipiell lassen sich auch hier zwei Gruppen differenzieren. Zum einen die Teile ohne Abweichungen, hier mit „ein Bauteil“ bezeichnet, und zum anderen Bauteile mit Abweichungen untereinander. Die Teile mit Abweichungen lassen sich weiterhin in zwei Untergruppen unterteilen. Einerseits Teile, die zu einer Produktfamilie gehören, das heißt

die Produkte sind in ihrer Fertigung prinzipiell gleich oder ähnlich (vgl. Martin 1989, S. 20) und unterscheiden sich nur in einigen Detailvarianten. Andererseits können die Teile strukturell unterschiedlich sein. In diesem Fall werden die Teile unter dem Begriff "ganzes Teilespektrum" zusammengefasst. Eine Zwischenstufe bildet die Fertigung mehrerer Produktfamilien. Dabei ist die Heterogenität begrenzt, da trotz großer Unähnlichkeit zwischen den Produktfamilien die Ausprägung der Merkmale immer innerhalb der engen Grenzen der Produktfamilie liegt. Um von der Varianz eine Fertigungsart ableiten zu können, müssen zudem die Stückzahl und die Ausbringungsverteilung bekannt sein.

Für die Vibrationsreinigung ist die Varianz der Teile vor allem hinsichtlich der Saugbacken von Bedeutung, die für jede Variante individuell hergestellt werden müssen. Bei einer großen Anzahl an Bauteilvarianten bedeutet dies eine entsprechend hohe Anzahl an Saugbacken, die zum einen konstruiert und gefertigt und zum anderen auch gelagert werden müssen. Darüber hinaus führen häufige Rüstprozesse zu einer verminderten Maschinenverfügbarkeit der Vibrationsreinigungsanlage. Daher ist die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes der Vibrationsreinigung für jeden Anwendungsfall individuell zu prüfen. Durch die entwickelten Schnellrüstkonzepte (vgl. Kapitel II.1.6) können die rüstbedingten Maschinenstillstände reduziert und die Wirtschaftlichkeit somit erhöht werden.

Durchsatz

Eine wesentliche Leistungsanforderung an ein Reinigungsverfahren ist die Menge der zu reinigenden Bauteile. Bisher wird in der Literatur häufig von Durchsatz in Kilogramm pro Periode gesprochen (Kloke 2003, S. 42; Schulz 2006b). Diese Einheit stammt aus der Batchreinigung und verhindert eine transparente und verursachungsgerechte Bewertung des Reinigungsaufwandes pro Bauteil. Durch die Vibrationsreinigung, als ein Einzelteil-Reinigungsverfahren, kann die Reinigungsdauer unmittelbar für ein Teil bestimmt bzw. auch gefordert werden. Die Zykluszeit für die Reinigung pro Teil darf zur Realisierung einer synchronen Fertigung die Taktzeit des betreffenden Wertstroms nicht überschreiten (Rother und Harris 2004, S. 61). Um die Wichtigkeit der Einhaltung der Taktzeit hervorzuheben, wird in dieser Gruppe unterschieden, ob die Zykluszeit pro Teil der Taktzeit, bzw. die Zykluszeit pro Batch der Summe der zur Verfügung stehenden Takte entspricht oder nicht. Jedoch kann die Bestimmung der Zykluszeit für die definierte Reinigung eines Bauteils bisher noch nicht prospektiv erfolgen, da die Wirkzusammenhänge noch nicht ausreichend bekannt sind. Somit ist es an dieser Stelle erforderlich auf bereits vorhandenes Expertenwissen zurück zu greifen und zusätzliche Reinigungsversuche durchzuführen. Hierbei ist zu überprüfen, ob das gewünschte Reinheitsergebnis innerhalb der vorgegebenen Taktzeit erreichbar ist oder ob Reinigungsparameter verändert werden müssen.

Art der Verschmutzung

Unter Verschmutzungen sind allgemein alle partikelförmigen, molekularen, nicht partikelförmigen oder biologischen Einheiten zu verstehen, die sich auf das Produkt oder den Prozess nachteilig auswirken können (DIN EN ISO 14644-4:2001). Die Herkunft der Verschmutzungen kann dabei sehr vielfältig sein. Bei vielen Verunreinigungen handelt es sich um Späne aus vorgelagerten zerspanenden Fertigungsprozessen oder um Rückstände sogenannter Fertigungshilfsstoffe, wie Schmierstoffe oder Korrosionsschutz (FiT 2007). Aber auch aus Transportoperationen und der Lagerung von Produkten kann eine Verschmutzung der Bauteile resultieren (Richard 2009, S. 119). Aufgrund der Vielzahl verschiedener Einflussmöglichkeiten innerhalb eines Produktionsbereiches auf die Bauteilsauberkeit von Werkstücken liegen bei einem zu reinigenden Bauteil in der Regel verschiedene Verunreinigungen vor. Eine exakte Beschreibung dessen, welche Bestandteile auf den Bauteiloberflächen in welcher Zusammensetzung verbleiben, ist ohne aufwändige Oberflächenanalyse nicht möglich. Um die Schmutzzusammensetzung grob klassifizieren zu können, wurde in Abbildung II.1 die Auswahl auf die Gruppen Metallspäne, KSS, Öle/Fette, Ziehmittel, Polier- und Schleifmittel und Rost/Zunder/Sonstige zusammengefasst (vgl. Kloke 2003, S. 37).

Bei der Vielzahl an unterschiedlichen Verschmutzungsarten eignet sich die Vibrationsreinigung insbesondere für das Entfernen partikelförmiger Verunreinigungen wie Metallspäne und / oder Partikel. Darüber hinaus ist es auch möglich nicht partikelförmige Verunreinigungen wie KSS oder Öle zu entfernen, bei denen eine geringe Adhäsionskraft zwischen Verunreinigung und Bauteil vorhanden ist. Da die Adhäsionskraft bei dünneren Verschmutzungsschichten zunimmt und der Energiebedarf für deren Ablösung exponentiell steigt, ist es mit der Vibrationsreinigung nicht möglich, eine vollständige Ablösung nicht partikulärer Verunreinigungen, wie z. B. Öle, zu erzielen. Zieh-, Polier- und Schleifmittel sowie Rost und Zunder können mit dem reinen Vibrationstrockenreinigungsverfahren generell nicht entfernt werden.

Schmutzmenge

Als eine weitere wesentliche Kenngröße, die neben der Art der Verschmutzung den Verunreinigungszustand eines Bauteils charakterisiert, wurde die Schmutzmenge identifiziert. Anhand dieser lassen sich wichtige Komponenten der Reinigungsanlage und die erforderliche Reinigungszeit bestimmen. Um die Menge des an einem Bauteil haftenden Schmutzes quantitativ genau zu erfassen, sind in der Regel Laboranalysen erforderlich. In der Praxis und insbesondere in Planungsphasen erweisen sich diese Analysen jedoch oftmals als zu zeitaufwändig (vgl. Kloke 2003, S. 36). Aufgrund dessen kann in Abhängigkeit der Anforderungen, die an den Reinigungsprozess und dessen Planungsgenauigkeit gestellt werden, ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Schmutzmenge durchgeführt werden. Um die Schmutzmenge quantitativ beurteilen zu können, werden bei diesem Verfahren lediglich vier Kategorien herangezogen. Die Beurteilung erfolgt dabei visuell und ohne aufwändige Analyseverfahren, wodurch eine schnelle und hinreichend genaue Einteilung möglich wird. Im Rahmen der Kategorisierung lassen sich die Bauteile mit ihren Schmutzmengen in die Klassen „in Öl/ Schmutz

stehende“, „stark verschmutzte“, „leicht verschmutzte“ und „nach Augenschein saubere Bauteile“ unterscheiden. Einfache, nach visueller Kontrolle zu beurteilende Vergleichsmerkmale, wie der Vergleich des Bauteilvolumens mit dem vorliegenden Schmutzvolumen, gewährleisten dabei eine weitestgehend realistische Einteilung in eine der vier Kategorien (vgl. Kloke 2003, S. 36). Charakteristisch für die Kategorie „Bauteile stehen im Öl/Schmutz“ ist, dass, bedingt durch eine dicke Schmutzschicht, das Schmutzvolumen dem Werkstoffvolumen nahe kommt. Bauteile, die der Kategorie „stark verschmutzt“ zugeordnet sind, weisen hingegen, trotz deutlich sichtbarer Verschmutzung, ein Schmutzvolumen auf, welches im Vergleich zum Bauteilvolumen klein ist. Im Falle von leicht verschmutzten Bauteilen ist ein solcher Vergleich nicht mehr möglich, da die Verschmutzung gerade noch mit bloßem Auge erkennbar ist. Dafür werden in diesem Fall andere Erkennungsmerkmale definiert, wie z. B. ein leichter Grauschleier bei Verunreinigungen durch Flüssigkeiten. Bauteile lassen sich der Definition nach der vierten Kategorie, den „nach Augenschein sauberen Bauteilen“ zuordnen, wenn mit dem bloßen Auge keine Verschmutzung erkennbar ist.

Die Kategorisierung bezüglich der Schmutzmenge ermöglicht einen Überblick über den Verschmutzungszustand des zu reinigenden Bauteils und gibt Hinweise für die Wahl eines Reinigungsverfahrens. So ist es z. B. nicht sinnvoll eine Vibrationsreinigung einzusetzen, wenn die Bauteile dem Augenschein nach sauber sind und der zu entfernende Schmutz sich im Mikrobereich befindet. Hingegen bietet die Vibrationsreinigung erhebliche Potentiale wenn die Bauteile im Schmutz stehen bzw. stark verschmutzt sind, insbesondere dann, wenn es sich bei dem Schmutz um Rückstände des im vorangegangenen Prozess eingesetzten Bearbeitungsmediums, wie KSS oder Öl, handelt. Diese Rückstände können sehr gut abgereinigt werden und nach einem Filtrationsprozess dem Kreislauf der Bearbeitungsmedien wieder zugeführt werden.

Reinigungsgüte

Der Reinigungsprozess von Bauteilen ist in der Fertigung in den meisten Fällen als Vorbereitung der Oberfläche für einen weiteren Bearbeitungsschritt oder deren Einsatz im Betrieb erforderlich (Krämer 1993). Das Spektrum der Folgeprozesse und der Verwendungen, vor denen eine Teilereinigung notwendig ist, stellt sich dabei als sehr vielfältig dar. Daher unterscheiden sich auch die Reinheitsanforderungen an die Bauteile je nach Folgeprozess bzw. Verwendung sehr stark und reichen von der groben Entfernung sichtbaren Schmutzes bis hin zur Feinstreinigung (vgl. Kloke 2003, S. 41). Dabei ist zu berücksichtigen, dass absolut reine Oberflächen nur unter Ultrahochvakuumbedingungen herstellbar sind. Unter anderen Bedingungen wird auf den gereinigten Oberflächen immer eine geringe Restmenge an Verschmutzung vorhanden sein. Aus diesem Grund wird die Sauberkeit von Bauteilen indirekt über den noch verbliebenen Restschmutz definiert. Typ und Ausmaß dieser Restverschmutzung werden dabei durch den Ausgangszustand des Werkstückes mit der eingehenden Verschmutzung, den eingesetzten Reinigungsmedien und den angewendeten Verfahren beeinflusst. Dabei ist der erforderliche Reinheitsgrad eine der wichtigsten Größen zur Auswahl eines Reini-

gungsverfahrens und zur Festlegung von dessen Betriebsparametern (Schulz 2006b). Als Folge dessen hat der erforderliche Reinheitsgrad unmittelbar Auswirkung auf die Reinigungskosten, die Reinigungsdauer und oft auch auf die aus der Reinigung resultierende Umweltbelastung (vgl. Krämer 1993). Somit gilt für jeden Reinigungsprozess aus Sicht der Wirtschaftlichkeit: Die Reinigung sollte nicht so gut wie möglich, sondern nur so gut wie nötig erfolgen (vgl. Rochowicz und Ernst und Schmauz 2009). Dabei existieren kaum allgemeingültige, quantitative Reinheitsanforderungen an Bauteile für die verschiedenen Folgeprozesse (Haase u. a. 1996, S. 3 u. 13). So definiert z. B. Kloke (2003, S. 41) zwar vier Reinheitsklassen, die jedoch nicht mit quantitativen Werten belegt sind, sondern vom Anwender aufgrund von Vergleichen mit Referenzbeispielen zugeordnet werden müssen. Wie hier, so beruhen in vielen Fällen die Qualitätsangaben für die Sauberkeit eines Bauteils auf dem Erfahrungswissen des einzelnen Anwenders für seinen spezifischen Prozess (Grün 2006, S. 1).

Für die Eignung der Vibrationsreinigung in Wertströmen stellt die Erfüllung einer spezifischen Reinheitsanforderung das elementare Bewertungskriterium dar. In Rahmen des Projektes wurden partikelförmige Verunreinigungen fokussiert, da diese im Vergleich zu nicht partikulären Verunreinigungen, insbesondere im Bereich der Automobil- und deren Zulieferindustrie, besonders kritisch sind. Die Gründe hierfür sind vor allem darin zu sehen, dass selbst kleinste Mikropartikel die inzwischen sehr filigranen Düsen in Medium führenden Systemen zusetzen können und somit möglicherweise zu einem Versagen des Bauteils führen.

Da ein Bauteil minimale Restverunreinigungen aufweist, wird die Sauberkeit nach der Richtlinie VDA 19 des Verbandes der deutschen Automobiliindustrie indirekt über den vorhandenen partikulären Restschmutz definiert der angibt, wie viele Partikel einer bestimmten Größenklasse sich auf dem Bauteil befinden (VDA 19). Die Anzahl der tolerierten Partikel je Größenklasse ist dabei ein anwendungsspezifisches Maß und muss für jeden Anwendungsfall individuell festgelegt werden. Die Vibrationsreinigung muss somit in der Lage sein, diese Anforderung zu erfüllen. Hierbei haben verschiedene Reinigungsversuche zum Ende der Projektlaufzeit mit den Vibrationstrockenreinigungsverfahren ergeben, dass sich eine prozesssichere Reinigung bis zu einer minimalen Partikelgröße von 500 µm realisieren lässt. Ein höherer Sauberkeitsgrad lässt sich nur in Kombination der Vibrationstrockenreinigung mit einem Nassreinigungsverfahren erzielen.

Position der Teile

Ein weiteres, den Reinigungsprozess charakterisierendes, Kriterium ist die Position der Teile in der Reinigungsanlage. Anhand diesem Kriterium wird ersichtlich, in wie weit ein kontinuierliches Fließen der Produkte durch den Wertstrom von einem oder mehreren Reinigungsprozessen behindert wird. Im Falle einer Batchreinigung von Schüttgut werden eine Vielzahl, meist Kleinteile, zusammen in einem Reinigungskorb gesammelt, um gereinigt zu werden. Neben der Batchreinigung von Kleinteilen werden häufig auch gleichartige bzw. unterschiedliche Teile auf Werkstückträgern in einer Anlage gemeinsam gereinigt. Hierdurch ist es nicht möglich, einzelne Teile bedarfsgerecht zu reinigen bzw. besonders verschmutzte Bereiche der Teile

direkt zu erreichen (vgl. Schulz 2006b). In diesen Fällen wird der Reinigungsaufwand an die maximal zu entfernende Schmutzmenge unter Berücksichtigung der höchsten Restschmutzvorgabe angepasst, wodurch eine hohe Blindleistung verursacht wird.

Bei der Vibrationsreinigung hingegen wird jedes Bauteil einzeln in die Anlage eingeführt, gereinigt und anschließend einzeln wieder entnommen. Auf diese Weise ist das Bauteil in der Anlage genau positioniert und kann dementsprechend bedarfsgerecht gereinigt werden. Insbesondere die bauteilspezifische Anströmung mit dem Luftstrom ermöglicht eine effiziente Abreinigung der vorhandenen Verunreinigungen an definierten Stellen. Auf diese Weise kann der Reinigungsaufwand an die Restschmutzvorgaben angepasst werden, wodurch Energie eingespart und die Reinigungsdauer reduziert werden kann.

II.1.1.2 Einflussfaktoren auf den Reinigungsprozess

Für eine weitergehende, prozessorientierte Analyse und Optimierung eines Reinigungsszenarios ist es, neben der Darstellung des Szenarios, erforderlich, eine Vielzahl charakteristischer Einflussgrößen auf den Reinigungsprozess zu erfassen (vgl. Foitzik 2002). Aktuell wird die Planung eines Reinigungsprozesses und die Wahl der Reinigungsanlage hauptsächlich durch die Anforderungen Werkstoffeigenschaften, Grad der Verschmutzung, Reinheitsanforderungen und Maschinenparameter beeinflusst, die während der Detailplanung für den Reinigungsprozess spezifiziert werden (Kloke 2003, S. 36f.; Schulz 2006b). Diese Anforderungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf den Reinigungsprozess selbst ohne Berücksichtigung des gesamten Wertstromes eines Produktes. Für eine prozesssichere und wirtschaftliche Fertigung ist es zukünftig jedoch erforderlich, den gesamten Wertstrom zu berücksichtigen (Aurich 2006, S. 10). Um den Reinigungsprozess in Abhängigkeit eines Wertstroms zu planen bzw. zu optimieren, ist somit eine weitaus detailliertere Ermittlung von Aspekten erforderlich, die den Reinigungsprozess beeinflussen. Im Rahmen des Forschungsprojektes ViReBa wurde deshalb ein Datenbogen (siehe Anhang A) entwickelt, der eine optimale Eingliederung der Bauteilreinigung in den Wertstrom gewährleisten soll. Dieser Datenbogen ist geeignet, um in einem geführten Interview ausgefüllt zu werden. Mit diesem können nicht nur Informationen über Reinheitsanforderungen, die Verschmutzung oder Werkstoffeigenschaften aufgenommen, sondern darüber hinaus Angaben über grundlegende Rahmenbedingungen innerhalb des Wertstroms eingetragen werden, um die Basis für einen wertstromorientierten Reinigungsprozess zu schaffen. Die verschiedenen Anforderungen und Einflussgrößen lassen sich, wie in Abbildung II.3 dargestellt, in die Kategorien Reinheit, Bauteil, Verschmutzung, Wertstrom, Handhabung, Rahmenbedingungen sowie spezielle Anforderungen unterteilen.

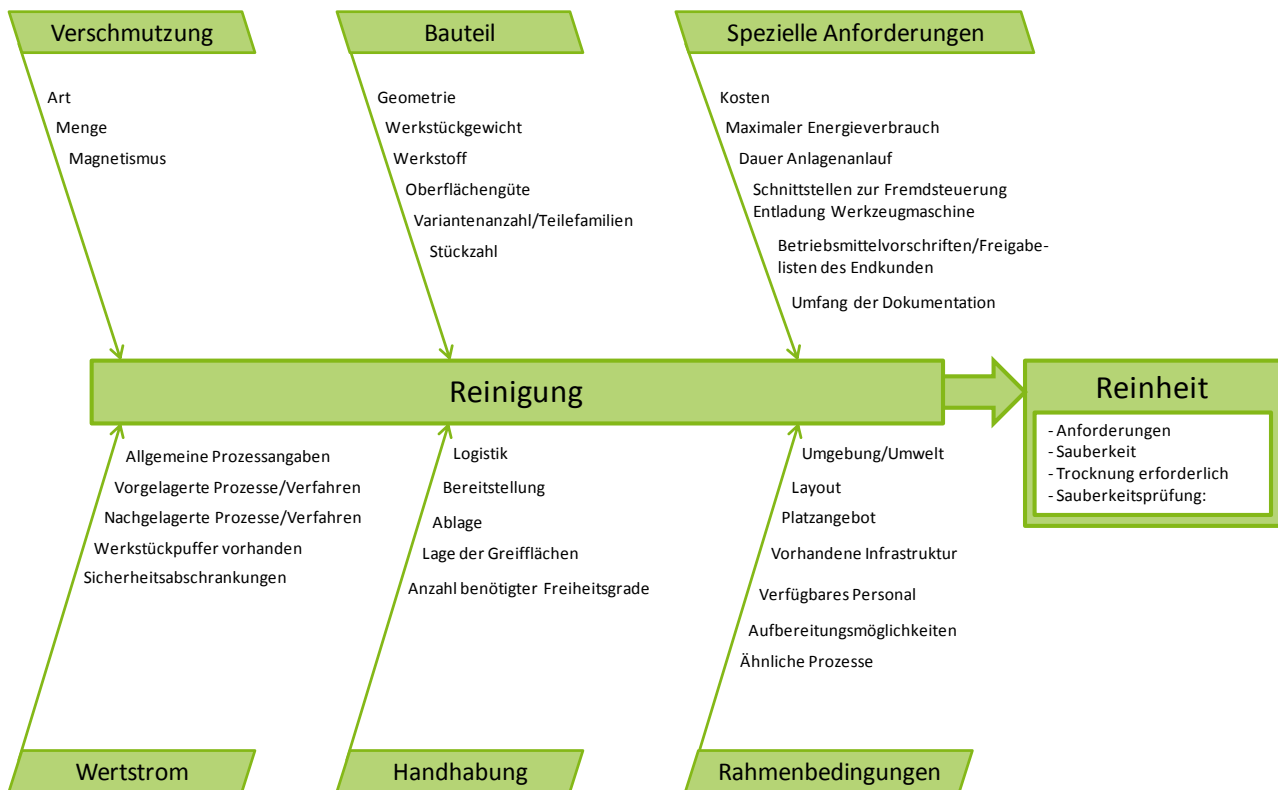


Abbildung II.3: Einflussgrößen auf den Reinigungsprozess

Die Angaben zu den Reinheitsanforderungen und dem Verschmutzungszustand werden benötigt, um die Reinigungsanlage zu konstruieren oder auszuwählen und um ein geeignetes Reinigungsmedium zu bestimmen. Zur genauen Auslegung des Prozesses sind darüber hinaus weitere Informationen über das Bauteil oder die Bauteilfamilie erforderlich. Zusammen mit den Informationen zum Wertstrom kann der Reinigungsprozess ganzheitlich geplant werden. Dabei ist es möglich, alle Aspekte zu berücksichtigen, welche für einen Reinigungsprozess innerhalb eines flexiblen Wertstromes relevant sind. Um einen Reinigungsprozess schließlich in den Wertstrom zu integrieren, müssen zudem Vorgänge, wie der Transport von Materialien, berücksichtigt werden. Diese Prozesse sind unerlässlich, da sie die Effektivität des Reinigungsprozesses in einigen Fällen auch limitieren. Aufgrund dessen ist es wichtig, diese Faktoren bereits zu Beginn des Planungsprozesses zu berücksichtigen, um eine umfangreiche Datenbasis zu schaffen. Die Datensammlung ist sehr detailliert, wodurch die Planungen zur Integration der Vibrationsreinigungsanlage in eine Produktionslinie erleichtert werden, da die Daten zur Spezifizierung des Reinigungsprozesses genutzt werden können. Dies ermöglicht, die Reinigungsanlage mit den notwendigen Reinigungswerkzeugen und der geforderten Handhabung bezogen auf den Wertstrom zu planen. Zur Ermittlung und Dokumentation dieser Einflussgrößen in Anwendungsfällen bedarf es einer strukturierten Vorgehensweise.

II.1.1.3 Wertstromanalyse für Reinigungsszenarien

Wertstromanalyse und Wertstromdesign stellen weitere Werkzeuge zur Aufnahme, Dokumentation und Gestaltung verschwendungsarmer Prozessketten mit ihren Material- sowie Informationsflüssen im Sinne des kontinuierlichen Fließprinzips dar (Friedrich 2006, S. 33). Mit Hilfe dieser Werkzeuge ist es möglich, den Material- und Informationsfluss innerhalb eines betrachteten Bereiches anhand von standardisierten Symbolen darzustellen und diese strukturiert zu optimieren bzw. neu zu gestalten. Darüber hinaus lassen sich hiermit die Beziehungen eines Bereiches zu seinen Kunden und Lieferanten sowie zur Fertigungssteuerung darstellen. Der Detaillierungsgrad kann dabei von einer makroskopischen Betrachtung, bei der die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohmaterialherstellung bis zum Endverbraucher reicht, bis hin zu einer genaueren Auflösung, bei der lediglich ein Fertigungsbereich innerhalb eines Unternehmens betrachtet wird, reichen. Unabhängig von der Auflösung liegt der Fokus immer auf der gesamten Prozesskette und nicht auf einem einzelnen Fertigungsprozess (vgl. Rother und Shook 2000, S. 3).

Bei der dreistufigen Durchführung einer Optimierung einer Prozesskette mit Hilfe von Wertstromanalyse und -design wird zunächst der Ist-Zustand der Prozesskette anhand einer Wertstromanalyse aufgenommen und dargestellt. Hierdurch ergibt sich eine transparente und übersichtliche Visualisierung des Wertstromes mit allen wichtigen Informationen bzgl. der Prozesse sowie des Material- und Informationsflusses, die die Basis für Verbesserungen bilden (Erlach 2007, S. 37).

Die wesentlichen Informationen bzgl. der einzelnen Prozesse sowie des Materialflusses sind in einem Datenkasten unterhalb der einzelnen Fertigungsprozesse aufgeführt. In diesem Datenkasten befinden sich i. d. R. Prozessgrößen, wie Zykluszeit, Rüstzeit, Losgröße oder Mitarbeiteranzahl (Rother und Shook 2000, S. 19). Diese Angaben lassen sich vom Anwender beliebig erweitern, wodurch die Möglichkeit besteht, Informationen hinsichtlich der Verschmutzung von Bauteilen und deren Sauberkeitsanforderungen zu integrieren.

Darüber hinaus bietet die Wertstromanalyse die Grundlage für die ganzheitliche Gestaltung der Handhabungsoperationen innerhalb der Prozesskette. Für die Zielsetzung, die Vibrationsreinigungsanlage in Wertströme zu integrieren, wurde eine Methode entwickelt, mit der die Gestaltung aller Prozesse mit den dazugehörigen Handhabungsoperationen umfassend vorgenommen werden kann. Hierzu wurde die Methode des Wertstromdesigns mit den Symbolen der verschiedenen Handhabungsfunktionen aus der VDI-Richtlinie 2860 (VDI 2860) kombiniert (vgl. Abbildung II.4). Die VDI-Richtlinie findet vornehmlich Anwendung bei der systematischen Entwicklung von Lösungsprinzipien für einzelne Handhabungsfunktionen. Hierzu gilt es, die Handhabungsaufgabe anhand von Elementarfunktionen und zusammengesetzten Funktionen (Drehen, Verschieben, Lösen, Schwenken, Weitergeben etc.) eindeutig zu beschreiben. Dazu muss ein Funktionsplan mit den entsprechenden Handhabungssymbolen erstellt werden, in dem alle erforderlichen Handhabungsfunktionen in der richtigen Reihenfolge enthalten sind. Durch Kombination verschiedener Lösungsprinzipien zu Lösungsvarianten ergeben sich unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Randbedingungen potenzielle Handha-

lungskonzepte. Diese sind einander gegenüber zu stellen und zu bewerten, so dass die für einen Anwendungsfall am besten geeignete Variante ausgewählt werden kann.

Durch die Kombination der Handhabungssymbole mit den Elementen einer Wertstromdarstellung, welche über einen adäquaten Detaillierungsgrad verfügen sollte, können die fertigungsprozessverknüpfenden Elemente des Wertstroms (z. B. Bestand, FIFO-Bahn, Supermarkt) durch Handhabungsfunktionen repräsentiert werden. So lässt sich z. B. der Lagerprozess im Supermarkt durch die Funktion „geordnetes Speichern“ oder die Supermarktentnahme durch ein oder mehrere Verschiebefunktionen detaillieren. Auf diese Weise kann sowohl eine ganzheitliche Planung der Prozesskette unter Berücksichtigung aller Handhabungsoperationen, als auch die Entwicklung eines Handhabungssystems für einen speziellen Wertstrom erfolgen. Zudem können auf Basis dieser grafischen Darstellung Optimierungen einerseits in Bezug auf den Wertstrom und andererseits hinsichtlich der Handhabungsfunktionen vorgenommen werden. Allerdings ist die hier beschriebene Kombination nur bei der mikroskopischen Betrachtung des Wertstroms sinnvoll, da der Handhabungsfunktionsplan ein sehr detailliertes Werkzeug darstellt und somit der Detaillierungsgrad des Wertstroms hieran angepasst sein sollte.

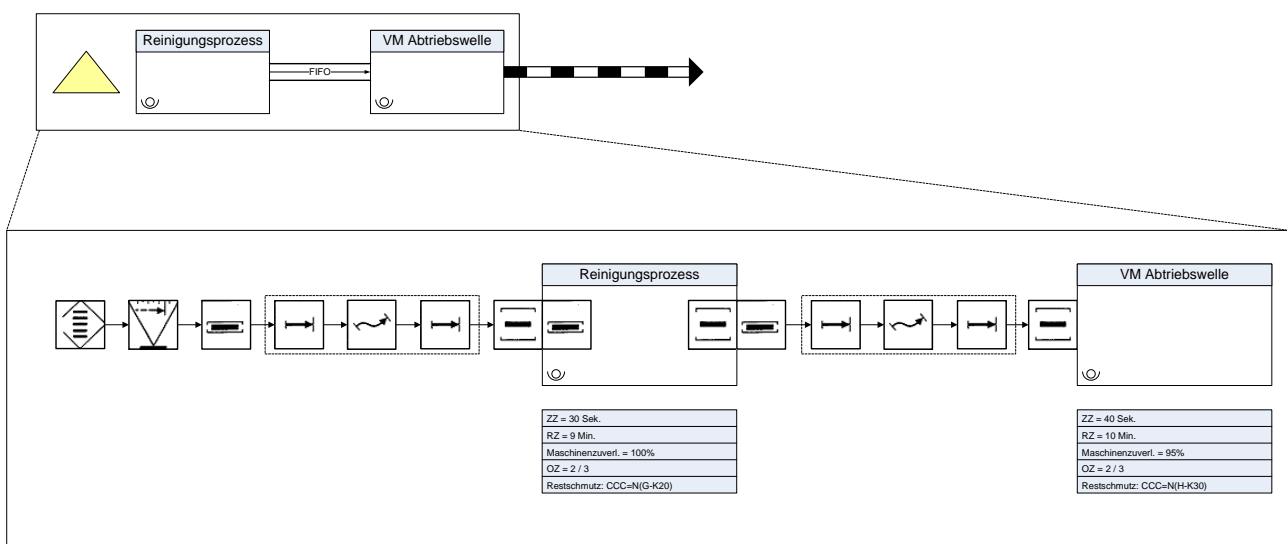


Abbildung II.4: Integration von Handhabungsfunktionen in eine Wertstromanalyse

Die originäre Aufgabe der Wertstromplanung – die ganzheitliche Prozessgestaltung – wird somit um standardisierte und klassifizierte Handhabungsfunktionen nach VDI 2860 erweitert. Auf diese Weise können im Zuge der ganzheitlichen Wertstromplanung auch verschwendungsbehaftete Handhabungsprozesse in strukturierter Art und Weise identifiziert, analysiert und gestaltet werden. Somit kann die Integration der Vibrationsreinigung in Fertigungslinien von Anfang an unter Berücksichtigung ablauforganisatorischer Parameter, der erforderlichen Handhabungsoperationen und im Hinblick auf die Erzielung und Beibehaltung einer definierten Reinheit ganzheitlich geplant und gestaltet werden.

II.1.1.4 Wertschöpfungsrechner

Neben den erforderlichen technologischen Voraussetzungen der Vibrationsreinigungsanlage zu ihrer Integration in Fertigungslinien muss die Wirtschaftlichkeit des Reinigungsprozesses gewährt bleiben. Zur schnellen, überschlägigen Bestimmung der Einsparpotentiale, die mit dem Einsatz der Vibrationsreinigungsanlage erzielt werden können, wurde im Rahmen des Projektes ein Wertschöpfungsrechner entwickelt. Hiermit kann die Einsparung an Betriebskosten für den Reinigungsprozess, für den Entfall der Neubeschaffung für Bearbeitungsmedien der vorgelagerten Prozesse und für die Minimierung der Transport- und Handhabungsoperationen bestimmt werden. Für eine genaue Bestimmung aller mit dem Einsatz der Vibrationsreinigung verbundenen Kosten müssen weitaus umfangreichere Berechnungen durchgeführt werden (vgl. Wullstein S. 34ff.).

Dem in Abbildung 6.4 dargestellten Wertschöpfungsrechner liegt ein Modell zugrunde, welches anhand von Angaben über einen aktuellen Reinigungsprozess eine tabellarische Übersicht über die Leistung, Kosten und den Einsatz von Hilfsstoffen des Prozesses bietet. Zusätzlich wird ein Teil der Kenngrößen für die Vibrationsreinigungsanlage bestimmt, um einen Vergleich zu ermöglichen und das Einsparpotential für den Reinigungsprozess zu ermitteln.

Mit Hilfe der Angaben über das Werkstück, die Losgröße, die Taktzeit, die Medienanhaftung am Werkstück vor der Reinigung, den Betriebsstunden einer Anlage und die Werkstückausbringung pro Stunde wird die aktuelle Leistung der vorhandenen Reinigungsanlage berechnet. Die Werkstückausbringung pro Stunde und der Werkstückdurchsatz, der mit einer Vibrationsreinigungsanlage unter vergleichbaren Bedingungen und bei selbigen Prozesseingangsdaten zu erreichen ist, werden zum Vergleich ebenfalls ermittelt. Hiermit lässt sich ein Ausbringungsfaktor berechnen, der die Leistungen der beiden Anlagen ins Verhältnis setzt.

Neben dem Vergleich der Leistungsdaten wird mit Hilfe des Wertschöpfungsrechners eine Übersicht über die Kosten geschaffen, die im Zuge der Nutzung einer bestimmten Menge an Reinigungsmedien bei der Bauteilreinigung anfallen. Des Weiteren wird die Menge an Bearbeitungsmedium (z. B. KSS) erfasst, die in den Reinigungsprozess eingebracht und dort abgereinigt wird. An dieser Stelle werden somit Angaben darüber gemacht, in welchen Mengen Reinigungs- und Bearbeitungsmedien in den aktuellen Reinigungsprozess eingehen und wie viel davon anteilig wieder verwendet werden kann. Neben den eingebrachten Mengen ist auch deren Anschaffungswert von Bedeutung, um die entstehenden Kosten bestimmen zu können.

Die weitere Kostenübersicht, die durch den Wertschöpfungsrechner erstellt werden kann, beinhaltet zudem Angaben über Betriebskosten, Wartungskosten, Entsorgungskosten und Transport- / Lagerkosten einer vorhandenen Reinigungsanlage. Unter Betriebskosten werden an dieser Stelle in erster Linie Energiekosten verstanden. Bezüglich der Wartungs- und Betriebskosten bietet der Wertschöpfungsrechner die Möglichkeit eines unmittelbaren Vergleiches mit der Vibrationsreinigungsanlage. Betriebs- und Wartungskosten sind Werte, die nicht abhängig von spezifischen Prozessdaten generiert werden, sondern basierend auf Erfahrungswerten der Firma vibro-tec GmbH aus Versuchen und Pilotanwendungen der Vibrations-

reinigungsanlagen ermittelt wurden. Der direkte Vergleich zwischen den Entsorgungskosten, die im Zuge der Nutzung einer Vibrationsreinigungsanlage aufgewendet werden müssen, entfällt insofern, als dass Entsorgungskosten bei einer Vibrationsreinigungsanlage nicht anfallen, da kein Reinigungsmedium verwendet wird und die Bearbeitungsmedien wiederholt in den Fertigungsprozess eingehen können. Auch für Transport- und Lagerkosten wird im Zuge der Kostenübersicht kein Vergleich zu denen, die bei Nutzung einer Vibrationsreinigungsanlage anfallen, aufgestellt. Bedingt durch die Tatsache, dass eine Vibrationsreinigungsanlage im Gegensatz zu zentralen Großreinigungsanlagen direkt in die Produktionslinie eingegliedert ist und das Prinzip des „One-Piece-Flow“ realisiert wird, werden jegliche Transport- und Lagerkosten im Umfeld des Reinigungsprozesses vermieden.

Unter Verwendung der vielzähligen Eingangsgrößen, die den aktuellen Reinigungsprozess kennzeichnen, wird auf Grundlage dieser Daten das Einsparpotential ermittelt, welches sich durch die alternative Nutzung einer Vibrationsreinigungsanlage ergibt. Dabei wird der Rückgewinn von Bearbeitungsmedien aus der aktuell genutzten Reinigungsanlage dem der Vibrationsreinigungsanlage gegenübergestellt. Die Möglichkeit der Rückgewinnung von Bearbeitungsmedien bei der Vibrationsreinigungsanlage wurde dabei, basierend auf Erfahrungswerten der Fa. vibro-tec, auf einen Wert von 95% der Ausgangsmenge festgesetzt. Das Einsparpotential bezüglich der Bearbeitungsmedien wird anhand des Rückgewinnungsmehrwerts der Vibrationsreinigungsanlage dargestellt. Dieser ergibt sich als Differenz zwischen der auf den Durchsatz bezogenen Rückgewinnung des Bearbeitungsmediums mit der vorhandenen Anlage und der Rückgewinnung von 95%, die der Einsatz einer Vibrationsreinigungsanlage möglich macht. Im Rahmen der Ermittlung des Einsparpotentials werden, neben dem Rückgewinnungsmehrwert, weitere der bereits in der Übersicht angegebenen Kosten dem möglichen Einsparpotential tabellarisch gegenüber gestellt.

Der Wertschöpfungsrechner ermöglicht, dass zunächst im Einzelnen ein Überblick darüber gewonnen wird, welche Hilfsstoffe der aktuelle Reinigungsprozess beansprucht und welche Kosten hierdurch verursacht werden, wodurch eine große Transparenz geschaffen wird. Anschließend kann abgewägt werden, ob Kennzahlen, die durch Einsatz einer Vibrationsreinigungsanlage ermöglicht werden, ohne Anschaffung einer solchen zu erreichen sind und ob die Einsparungen, die durch Angabe des Wertschöpfungspotentials ermittelt wurden sich gegenüber dem Anschaffungspreis einer solchen Maschine wirtschaftlich rechnen. Im Zuge einer möglichst wirtschaftlichen Produktion sollen die Kosten für den Produktionsprozess möglichst gering gehalten werden. Der Einsatz des Wertschöpfungsrechners kann aufzeigen, an welchen Stellen im Hinblick auf einen Reinigungsprozesses Einsparungen möglich sind und an welchen Stellen der Einsatz einer Vibrationsreinigungsanlage zur Prozessverbesserung beitragen kann.

Der Wertschöpfungsrechner wird interessierten Kunden auf der Homepage der Fa. vibro-tec (www.vibro-tec.de) zur kostenlosen Nutzung zur Verfügung gestellt.



Wertschöpfungsrechner vibro-tec:

Bitte die gelb unterlegten Felder ausfüllen

Werkstück:		
Losgröße:		
Taktzeit in Sekunden:		
Medienanhaftung am Werkstück vor der Reinigung in g:		
Betriebsstunden vorhandene Reinigungsanlage/Tag:		
Aktuelle Werkstückausbringung/Stunde vorhandene Anlage:		
Werkstückausbringung/Stunde vibro-tec Anlage:	0	
Werkstückdurchsatz/Tag vibro-tec Anlage:	0	
Kosten für anhaftendes Bearbeitungsmedium/kg in €:		
Kosten für verwendetes Reinigungsmedium/kg in €:		
Einbringung Bearbeitungsmedium in vorhandene Anlage/Stunde in kg:	0	
Rückgewinnung Bearbeitungsmedium mit vorhandener Anlage/Werkstück in g:		
Rückgewinnung Bearbeitungsmedium mit vorhandener Anlage/Werkstück in kg:	0,000000	
Rückgewinnung Bearbeitungsmedium mit vorhandener Anlage/Stunde in kg:	0	
Erforderliche Menge Reinigungsmedium für vorhandene Anlage/Stunde in kg:		
Entsorgungskosten/kg in €:		
Betriebskosten für vorhandene Anlage/Stunde in €:		
Betriebskosten für vibro-tec Anlage/Stunde in €:	3,00 €	
Wartungskosten für vorhandene Anlage/Stunde in €:		
Wartungskosten für vibro-tec Anlage/Stunde in €:	0,20 €	
Transport- und Lagerkosten im bestehenden Prozessablauf/Stunde:		
Ausbringungsfaktor vorhandene Anlage/vibro-tec Anlage:	0	
Wertschöpfungspotential Vibrationsreinigung		€ Einsparung mit vibro-tec pro Stunde in €
Kosten für eingebrachtes Bearbeitungsmedium/Stunde in €:	0,00 €	
Durchsatzbezogene Rückgewinnung von Bearbeitungsmedium mit vorhandener Anlage/Stunde in kg:	0	
Durchsatzbezogene Rückgewinnung von Bearbeitungsmedium mit vorhandener Anlage/Stunde in €:	0,00 €	
ca. 95% Rückgewinnung des Bearbeitungsmediums durch vibro-tec/Stunde in kg:	0	
ca. 95% Rückgewinnung des Bearbeitungsmediums durch vibro-tec/Stunde in €:	0	
Rückgewinnungs-Mehrwert der vibro-tec Anlage/Stunde in €:	0,00 €	0,00 €
Einsparung Betriebskosten/Stunde in €:	0,00 €	0,00 €
Kosten für Reinigungsmedieneinsatz/Stunde in €:	0,00 €	0,00 €
Einsparung Wartungskosten/Stunde in €:	0,00 €	0,00 €
Einsparung Entsorgungskosten/Stunde in €:	0,00 €	0,00 €
Einsparung Transport- und Lagerkosten/Stunde:	0,00 €	0,00 €
		0,00 €

Abbildung II.5: Wertschöpfungsrechner

Mit Hilfe der in diesem Abschnitt vorgestellten Methoden und Werkzeuge ist es möglich, den Einsatz der Vibrationsreinigungsanlage für unterschiedliche Anwendungsfälle zunächst zu überprüfen und anschließend detailliert zu planen.

II.1.2 Konstruktionssystematische Untersuchung des Spannwerkzeugs

Neben der Untersuchung geeigneter Anwendungsbereiche für die Vibrationsreinigung war das Ziel eines weiteren Arbeitspakets, den Schwingungserzeuger und das Spannwerkzeug der Vibrationsreinigungsanlage unter konstruktiven Gesichtspunkten weiter zu entwickeln. Unter der Prämisse, dass eine negative Beeinflussung des Absaugstroms im Saugwerkzeug zu verhindern ist, sollten im ersten Teil dieses Arbeitspakets zunächst für unterschiedliche Bauteile möglichst kleinflächig greifende Spannwerkzeuge entwickelt werden. Um die Anzahl der zu entwickelnden Spannwerkzeuge zu minimieren, sollten Cluster bzw. Gruppen zu reinigender Werkstücke bzw. Bauteile gefunden werden, die mittels eines Werkzeugs gespannt werden können.

Bei der Formulierung der Arbeitspakete wurde davon ausgegangen, dass hierzu ein weites Spektrum unterschiedlich zu reinigender Bauteile durch die assoziierten Projektpartner zur Verfügung gestellt wird. Auf Grund eines in der Wirtschaftskrise des vergangenen Jahres begründeten teilweise stark reduzierten Engagements der assoziierten Projektpartner wurden den projektabwickelnden Institutionen jedoch nur wenige Bauteile - darunter ausschließlich Kurbel- und Getriebewellen - zur Verfügung gestellt. Die angestrebte Clusterung gleichartiger zu reinigender Bauteiltypen anhand real existierender Teile wurde daher weitestgehend hinfällig.

Somit konnten lediglich die oben genannten Bauteile zur Gruppe der wellenförmigen Bauteile zusammengefasst werden. Untersuchungen an den Bauteilen dieser Gruppe haben ergeben, dass sich diese am effektivsten über die in den Stirnseiten gelegenen Zentrierbohrungen mit Hilfe von kegelförmigen Zentrierspitzen fixieren lassen. Gegenüber alternativen Methoden - denkbar wäre z. B. das umschließende Greifen des Bauteils am Durchmesser - ist diese Art des Spannens klar zu bevorzugen, da hier das Fixieren des Bauteils auf kleinstmöglicher Fläche formschlüssig realisiert wird. Die abzureinigende Oberfläche des Bauteils wird daher nur in einem sehr kleinen Bereich verdeckt. Hierbei handelt es sich um den Innenbereich der Zentrierbohrungen, der jedoch auch unverdeckt nur schwer von der Absaugströmung erreicht werden kann und somit durch die Vibrationsreinigung kaum reinigbar ist.

Ein weiterer Aspekt, der für die Verwendung der oben beschriebenen, kegelförmigen Zentrierspitzen spricht, ist die Tatsache, dass hierdurch der Absaugstrom im Saugwerkzeug und damit die Reinigungsleistung des Vibrationsreinigungsverfahrens nur in vernachlässigbar geringem Maße beeinflusst wird.

Des Weiteren dienen die Zentrierspitzen nicht nur zum Einspannen, sondern auch zur Übertragung der Vibrationen auf das Bauteil. Bei der Formulierung des zweiten Arbeitspakets wurde in Betracht gezogen, die Funktion der Schwingungsübertragung von der Funktion des Spannens zu trennen und damit vom Spannwerkzeug abzugliedern. Dies erscheint jedoch - zumindest für die hier betrachteten wellenförmigen Bauteile - nicht sinnvoll. Würden die Schwingungen nicht über die Zentrierspitzen auf das Bauteil übertragen werden, so müsste

dies durch eine zusätzliche Berührung und damit Verdeckung der Bauteiloberfläche realisiert werden. Dies würde zu einer potentiellen Verschlechterung des Reinigungsergebnisses führen.

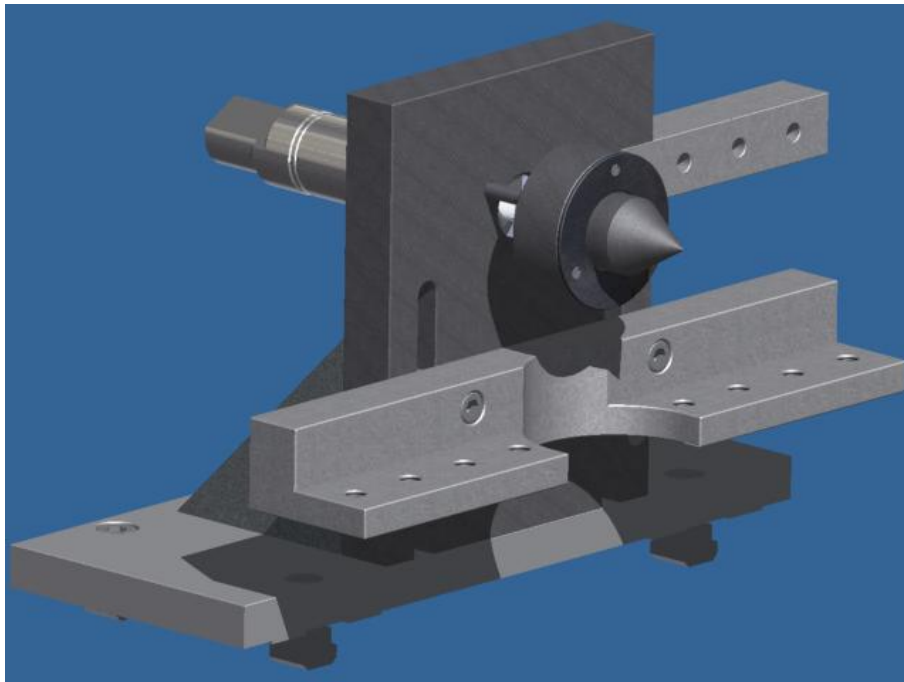


Abbildung II.6: Spannwerkzeug (Spannzylinder)

Kegelförmige Zentrierspitzen als Spannwerkzeuge wurden bereits vor Beginn des Forschungsprojekts ViReBa in Vibrationsreinigungsanlagen eingesetzt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden diese jedoch weiterentwickelt. Dabei wurde zunächst eine Rotationsfunktion implementiert, die es ermöglicht, das zu reinigende Bauteil - vorausgesetzt es handelt sich um ein rotationssymmetrisches Bauteil - im Saugwerkzeug um seine Achse zu rotieren. Durch die bei der Rotation potentiell auftretenden Beschleunigungskräfte kann die verunreinigungslösende Wirkung der Schwingungen unterstützt bzw. verbessert werden. Die Funktion wurde realisiert, indem die spannzylinderseitige Zentrierspitze drehbar gelagert wurde. Die zweite Zentrierspitze wurde ebenfalls drehbar gelagert, jedoch zusätzlich so konstruiert, dass über einen Zahnriemen eine Rotationsbewegung in das zu reinigende Bauteil eingeleitet werden kann (vgl. Abbildung II.6 und Abbildung II.7).

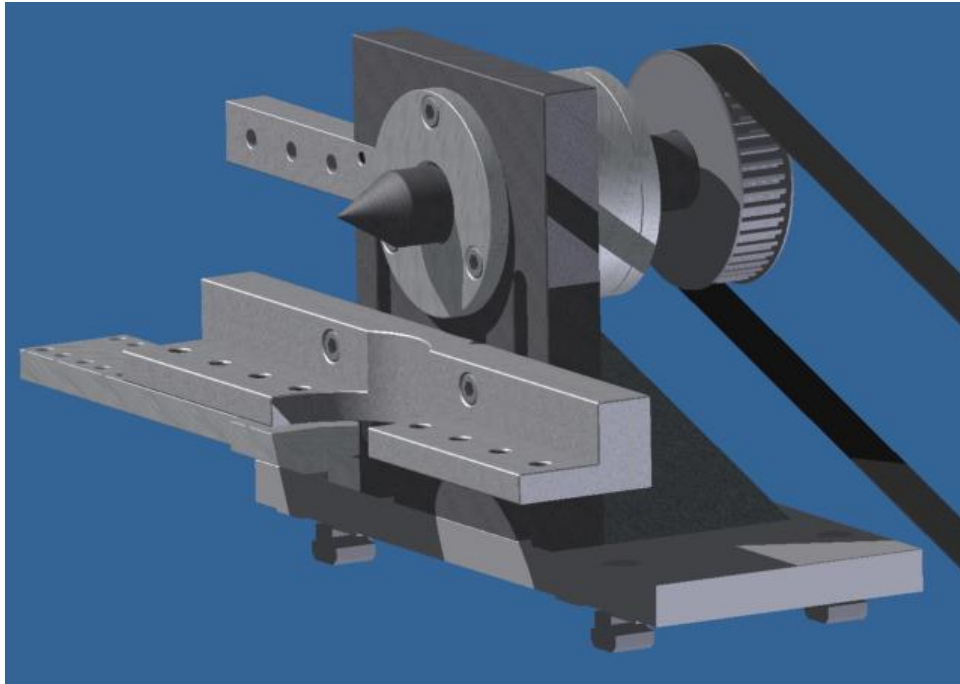


Abbildung II.7: Spannwerkzeug (Antrieb)

Des Weiteren wurden die Spannwerkzeuge bzw. das Spannsystem derart optimiert, dass eine sehr hohe Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Werkstückabmessungen erreicht werden konnte. Das heißt, das Spannsystem kann mit wenigen Handgriffen so eingestellt bzw. angepasst werden, dass wellenförmige Bauteile in einem Durchmesserbereich zwischen 20 und 220 Millimetern und einer Länge zwischen 200 und 400 Millimetern gespannt werden können (vgl. Abbildung II.8).

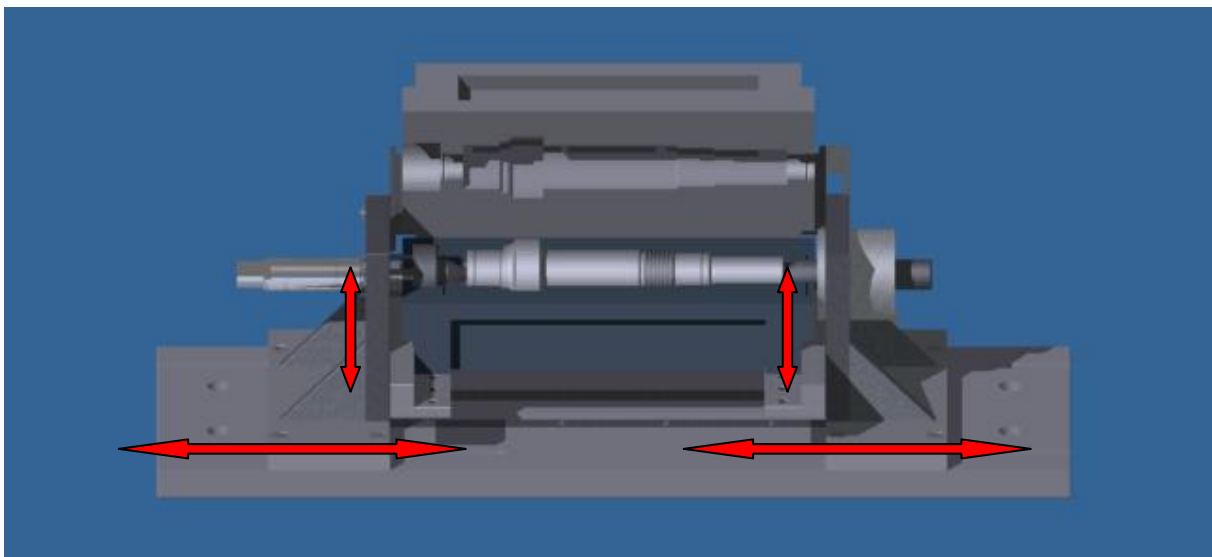


Abbildung II.8: Flexibel einstellbares Spannwerkzeug

II.1.2.1 Modularisierung des Saugwerkzeugsystems

Die reinigende Wirkung des Vibrationsreinigungsverfahrens beruht auf der Kombination zweier mechanischer Effekte: Das zu reinigende Bauteil wird in Schwingung versetzt, wodurch die Adhäsionskräfte, welche die partikulären und flüssigen Verunreinigungen am Bauteil halten, überwunden werden. Darüber hinaus wird das Bauteil durch eine Luftströmung umströmt, durch welche die von den Vibrationen gelösten Verunreinigungen abgesaugt und fortgetragen werden (vgl. Abbildung I.4). Die Luftströmung bzw. der Absaugstrom wird mit Hilfe eines Verdichters in Verbindung mit einem Saugwerkzeug erzeugt. Bei dem Saugwerkzeug handelt es sich um eine zweigeteilte, das Bauteil umschließende Form - ähnlich einer Gussform - deren Innenkontur im Gegensatz zur Außenkontur um ca. zwei Millimeter vergrößert ist. Das zu reinigende Bauteil ist dadurch von einem Luftspalt umgeben. Durch diesen wird die Absaugluft, angesaugt über die Ansaugöffnungen in der oberen Saugwerkzeughälfte und abgesaugt über die Absaugöffnungen in der unteren Saugwerkzeughälfte, entlang des zu reinigenden Bauteils geleitet (vgl. Abbildung II.9).

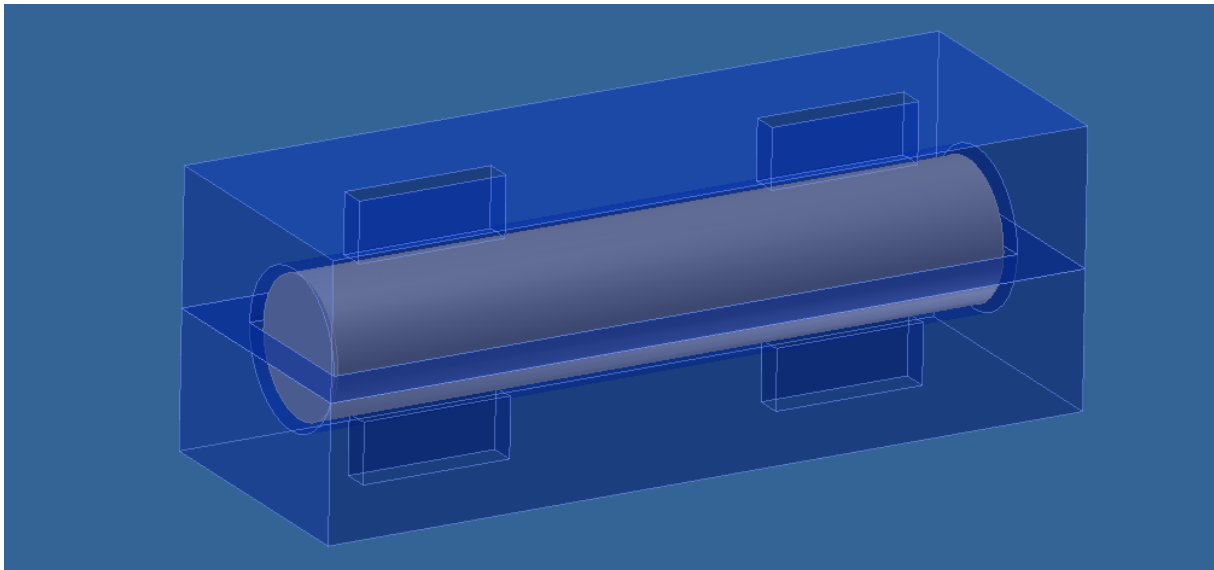


Abbildung II.9: Saugwerkzeug mit wellenförmigem Bauteil und Luftspalt

Mit der Formulierung des Arbeitspakets wurde die These aufgestellt, dass es möglich sei, Saugbackensysteme modular aufzubauen. Ziel sollte es sein, bei der Reinigung unterschiedlicher, nach dem Ähnlichkeitsprinzip konstruierter Bauteile, nicht komplette Saugwerkzeuge auszutauschen, sondern lediglich einzelne Saugwerkzeugmodule. Hierdurch sollten Anlagenrüstzeiten deutlich reduziert und gleichzeitig die Kosten für die Herstellung von Saugwerkzeugen gesenkt werden. Bezogen auf die im Rahmen von ViReBa untersuchten wellenförmigen Bauteile stellt sich hierbei folgende Frage: inwiefern beeinflusst das Austauschen einzelner Saugwerkzeugmodule die Innenkontur des Saugwerkzeugs bzw. welche Auswirkungen hat dies auf den Luftspalt und damit auf das Reinigungsergebnis des Verfahrens?

Werden bei der Reinigung unterschiedlicher, wellenförmiger Bauteile im selben Saugwerkzeug-Kern jeweils nur einzelne Saugwerkzeugmodule ausgetauscht, so ist zu erwarten, dass

dies in einigen Regionen des Werkzeugs zu einer Vergrößerung oder einer Verkleinerung des Luftspalts führt.

Die hieraus resultierenden Auswirkungen wurden anhand eines stark vereinfachten Wellenmodells mit Hilfe der Strömungssimulationssoftware ANSYS CFX untersucht. Wie bereits angedeutet, hängt das Reinigungsergebnis zu einem beträchtlichen Teil davon ab, dass das Bauteil optimal umströmt wird, weil hierdurch feste und flüssige Verunreinigungen vom Bauteil abgelöst und fortgetragen werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten im Saugwerkzeug bzw. im Luftspalt ausreichend hoch sind und alle Bauteilregionen vom Absaugstrom erfasst werden.

Abbildung II.10 und Abbildung II.11 zeigen die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit, dargestellt in Form von Stromlinien, in einem Saugwerkzeug mit einem Luftspalt von 8 Millimetern und in einem Saugwerkzeug mit einem Luftspalt von 2 Millimetern, jeweils bei einem Unterdruck von 400 Millibar.

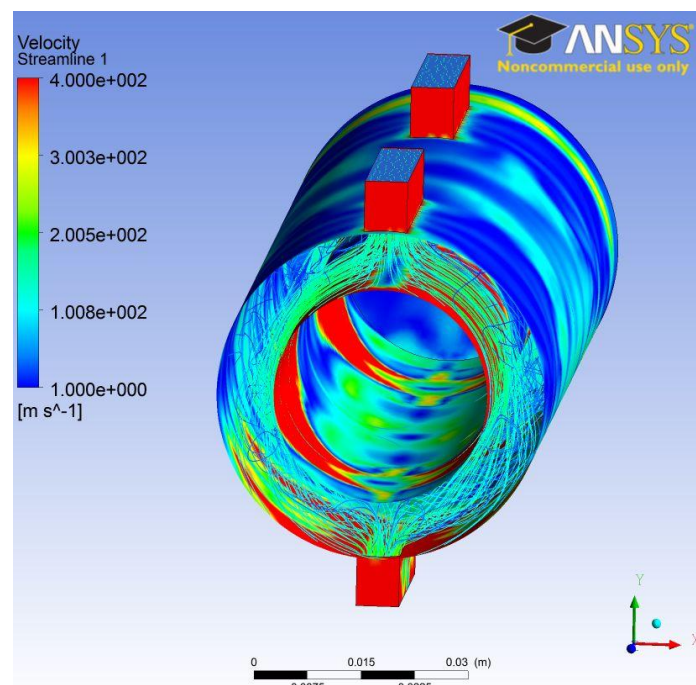


Abbildung II.10: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt 8 mm

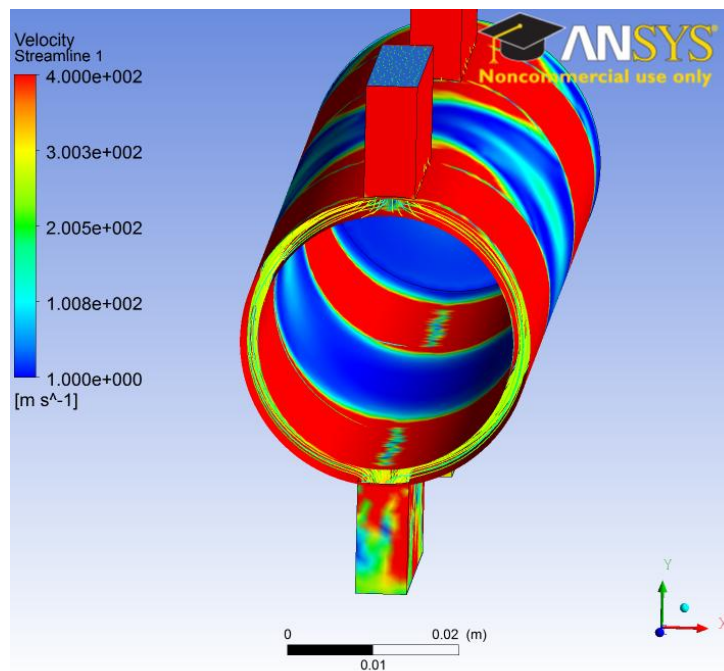


Abbildung II.11: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt 2 mm

Bei dem Vergleich von Abbildung II.10 und Abbildung II.11 wird deutlich, dass die Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmender Luftspaltbreite zunimmt. Bei einem Luftspalt von 8 Millimetern liegt diese bei ca. 150 Metern pro Sekunde, dagegen bei einem Luftspalt von 2 Millimetern bei ca. 300 Metern pro Sekunde. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Reinigungserfolg des Vibrationsreinigungsverfahrens offensichtlich von einem möglichst kleinen Luftspalt abhängt.

Vor Beginn des Forschungsvorhabens wurde das zu reinigende Werkstück in einem feststehenden, nicht schwingenden, Saugwerkzeug gereinigt bzw. in Schwingung versetzt. Die minimale Größe des Luftspalts war dadurch - um ein Anschlagen des Werkstücks am Saugwerkzeug zu verhindern und um damit einer Beschädigung von Saugwerkzeug und Werkstück entgegenzuwirken - durch die Amplitude des schwingenden Bauteils nach unten hin begrenzt. Um dieser Begrenzung zu entgehen wird das Saugwerkzeug zukünftig zusammen mit dem zu reinigenden Bauteil in Schwingung versetzt. Eine Grenze des Luftspalts nach unten ist damit nur noch dadurch gegeben, dass ein Abtransport der gelösten Verunreinigungen gewährleistet bleiben muss.

Eine Modularisierung des Saugwerkzeugsystems ist somit nur in solchen Fällen sinnvoll, in denen durch den Austausch einzelner Saugwerkzeugmodule die Größe des Luftspalts verkleinert oder aber nicht nennenswert vergrößert wird. Da die im Rahmen von ViReBa untersuchten wellenförmigen Bauteile stark unterschiedliche Geometrien bzw. sehr große Durchmesser- und Längenunterschiede aufweisen, erscheint eine Modularisierung des Saugwerkzeugsystems nicht erfolversprechend und wird daher nicht weiter verfolgt.

II.1.3 Konstruktionssystematische Untersuchung des Schwingungserzeugers

Abbildung II.12 zeigt den Schwingungserzeuger der Vibrationsreinigungsanlage in seiner ursprünglichen Form. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei Elektromagneten, dem Schwingtisch, zwei Blattfederpaketen und der Basisplatte. Während die beiden Elektromagnete einander gegenüberliegend, starr mit der Basisplatte verbunden sind, ist der Schwingtisch mittels der beiden Blattfederpakete mit der Basisplatte verbunden. Hierdurch wird die Schwingfähigkeit des Systems erreicht. Durch das wechselseitige Beschalten der beiden Magnete wird der Schwingtisch abwechselnd in die eine sowie die andere Richtung gezogen und somit in Schwingung versetzt.



Abbildung II.12: Schwingungserzeuger (ursprüngliche Version)

Die Vorteile der beschriebenen Anordnung liegen in ihrer Einfachheit sowie in ihrer Verschleiß- und Wartungsarmut. Die Anordnung birgt allerdings auch Nachteile.

Die Blattfederpakete übertragen zwar die Vibrationen auf den Schwingtisch und das Bauteil, sie wirken allerdings gleichzeitig - durch das aneinander reiben der einzelnen Blattfedern - schwingungsdämpfend (vgl. Blattfederpakete bei LKW).

Ein weiterer entscheidender Nachteil der Anordnung besteht darin, dass die Wirkrichtung der Vibrationen im laufenden Betrieb nicht veränderbar ist. Das heißt, je nachdem in welcher Orientierung Saugwerkzeug und zu reinigendes Bauteil auf dem Schwingtisch positioniert werden, wirken die Vibrationen entweder nur quer oder nur parallel zur Längsrichtung des Bauteils. Eine Beeinflussung des Reinigungsergebnisses in positiver Weise, welche durch eine Wirkrichtungsänderung der Vibrationen zu erwarten wäre, kann daher in der ursprünglichen Anlagenform nicht realisiert werden.

Abbildung II.13 zeigt eine mögliche Optimierungsvariante des Schwingungserzeugers, welche im Rahmen des zweiten Arbeitspakets entwickelt wurde. Dabei werden die Vibrationen ebenfalls mit Hilfe von Elektromagneten erzeugt. Allerdings werden die Schwingungen hier durch ein u-förmiges Bauelement, welches auf Rollen gelagert ist und rechts und links durch Spiral-

federn abgedämpft wird, auf den Schwingtisch übertragen. Über die Vorspannung der Spiralfedern wird die Amplitude bzw. die Auslenkung des Schwingtischs eingestellt.

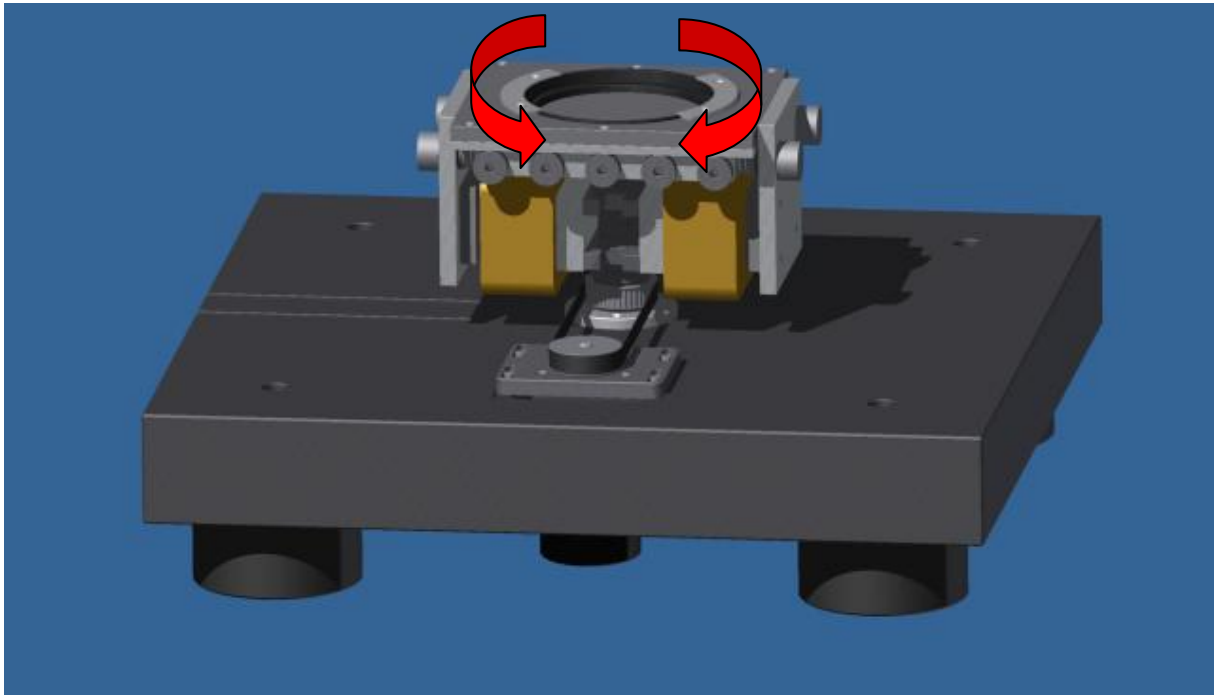


Abbildung II.13: Optimierter Schwingungserzeuger

Der stark schwingungsdämpfende Effekt der Blattfederpakete wird auf diese Weise umgangen, wodurch eine Steigerung der Reinigungswirkung und somit der Effektivität des Reinigungsverfahrens erreicht werden kann.

Der Schwingungserzeuger wurde zudem drehbar gestaltet, so dass die Wirkrichtung der Vibrationen mit Hilfe eines elektrischen Antriebs um bis zu 90 Grad verändert werden kann. Somit können die Vibrationen sowohl in Längsrichtung des Bauteils als auch quer zum Bauteil wirken.

Die Kopplung des Schwingungserzeugers und des Spannsystems wird mit Hilfe einer Topf-in-Topf-Lagerung realisiert. Das heißt, die Verbindung wird nach dem Schnellrüstprinzip hergestellt, indem lediglich der Topf an der Unterseite des Spannsystems in den zweiten Topf im Schwingungserzeuger eingesetzt wird. Dabei wird das Spannsystem durch die Keilriemenvorspannung des Rotationsantriebs des zu reinigenden Bauteils in Position gehalten (vgl. Abbildung II.14).

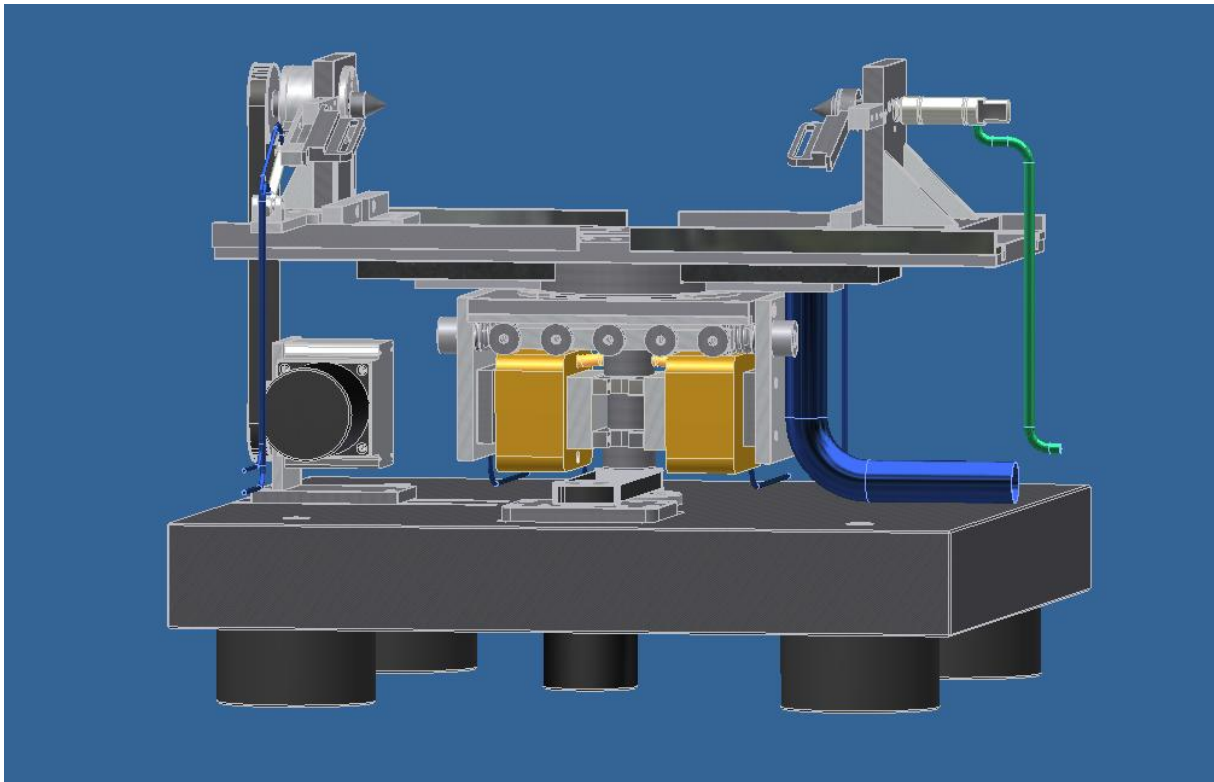


Abbildung II.14: Kopplung Schwingungserzeuger und Spannsystem

Die in Abbildung II.14 dargestellte Lösung ist eine vielversprechende Möglichkeit der Weiterentwicklung und Optimierung des Schwingungserzeugers bzw. der Vibrationsreinigungsanlage, die sich stark am ursprünglichen Funktionsprinzip (Schwingungserzeugung mit Hilfe von Elektromagneten) orientiert und damit in erster Linie den Vorteil bietet, dass die Reinigungsanlage verhältnismäßig kompakt gestaltet werden kann.

Die Hauptreinigungswirkung des Vibrationsreinigungsverfahrens beruht neben der Absaugung darauf, dass die in den Umkehrpunkten der Schwingung auftretenden Beschleunigungskräfte gegen die Adhäsionskräfte der am Bauteil anhaftenden Verunreinigungen wirken und somit die Verunreinigungen abgelöst werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass erhöhte Beschleunigungskräfte zu verbesserten Reinigungsergebnissen führen.

Messungen an einer Vibrationsreinigungsanlage mit elektromagnetischer Schwingungserzeugung haben gezeigt, dass hier Beschleunigungskräfte im Bereich des 3 bis 5-fachen der Erdbeschleunigung wirken. Mit alternativen Antriebskonzepten - wie etwa der Schwingungserzeugung mit Hilfe von Unwuchtmotoren - können dagegen Beschleunigungskräfte im Bereich des 6 bis 15-fachen der Erdbeschleunigung erreicht werden. Es wurde daher entschieden - zumindest im Rahmen des Forschungsvorhabens - vom ursprünglichen Antriebskonzept abzuweichen und beim Aufbau eines weiteren Versuchsstandes (vgl. Abschnitts II.1.5) zur Schwingungserzeugung auf Unwuchtmotoren zurückzugreifen. Unwuchtmotoren erzeugen eine rotatorische Schwingung, während durch den Elektromagnetenantrieb eine translatorische Schwingung erzeugt wird. Um dennoch eine grundsätzliche Vergleichbarkeit der Reinigungsergebnisse beider Antriebskonzepte erreichen zu können, muss die rotatorische Schwingung

der Unwuchtmotoren in eine translatorische Schwingung umgewandelt werden. Dies wird realisiert, indem zwei selbstsynchronisierende, gegenläufig arbeitende Unwuchtmotoren übereinander angeordnet werden (vgl. Abbildung II.15).

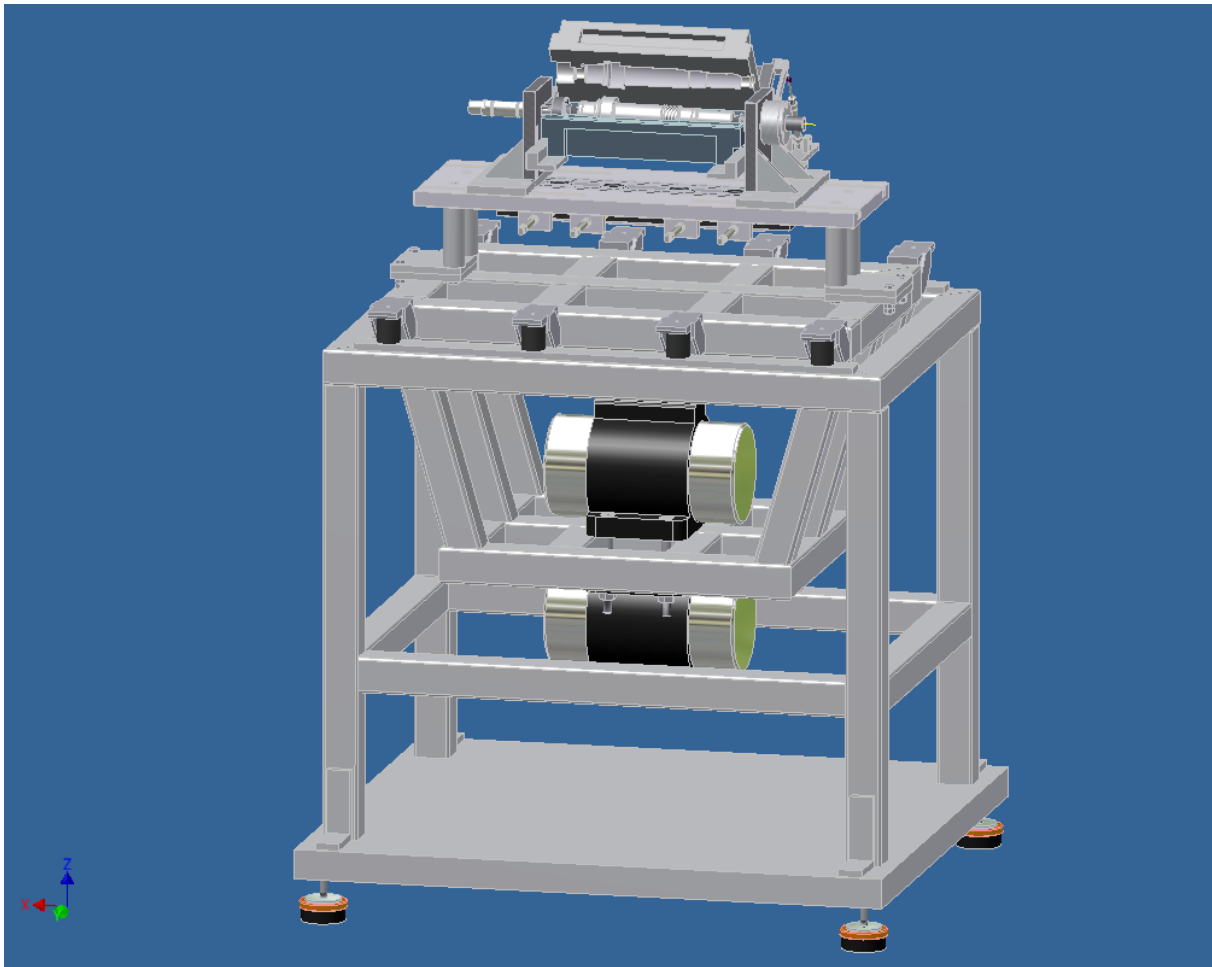


Abbildung II.15: Versuchsstand mit Unwuchtmotoren

Die hieraus resultierende im Gegensatz zum Magnetantrieb der kommerziellen Vibrationsreinigungsanlage weniger kompakte Bauweise kann bei der Versuchsanlage toleriert werden und stellt sogar auf Grund der besseren Zugänglichkeit der Komponenten einen Vorteil dar. Genauere Darstellungen der Versuchsanlage erfolgen in den Ausführungen im Abschnitt II.1.5.

II.1.4 Struktur- und Strömungssimulation

II.1.4.1 Entwicklung einer Methode zur Erstellung strömungsoptimaler Saugwerkzeuge

Bei der Vibrationsreinigung findet die Reinigung von Bauteilen innerhalb bauteilspezifischer Saugbacken statt. Mit Hilfe der Simulationssoftware ANSYS CFX wurden die strömungsmechanischen Vorgänge im Luftspalt, im Bereich zwischen dem zu reinigenden Bauteil und der Innenkontur des Saugwerkzeugs, qualitativ erfasst, visualisiert und beurteilt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens ViReBa wurde zudem eine Methode entwickelt, bei der auf Basis der

durchgeführten Strömungssimulation strömungsoptimierte und damit reinigungsgerechte Saugwerkzeuge erstellt werden können. Die Methode wird im Folgenden anhand der in Abbildung II.16 dargestellten Mustergetriebewelle erläutert.

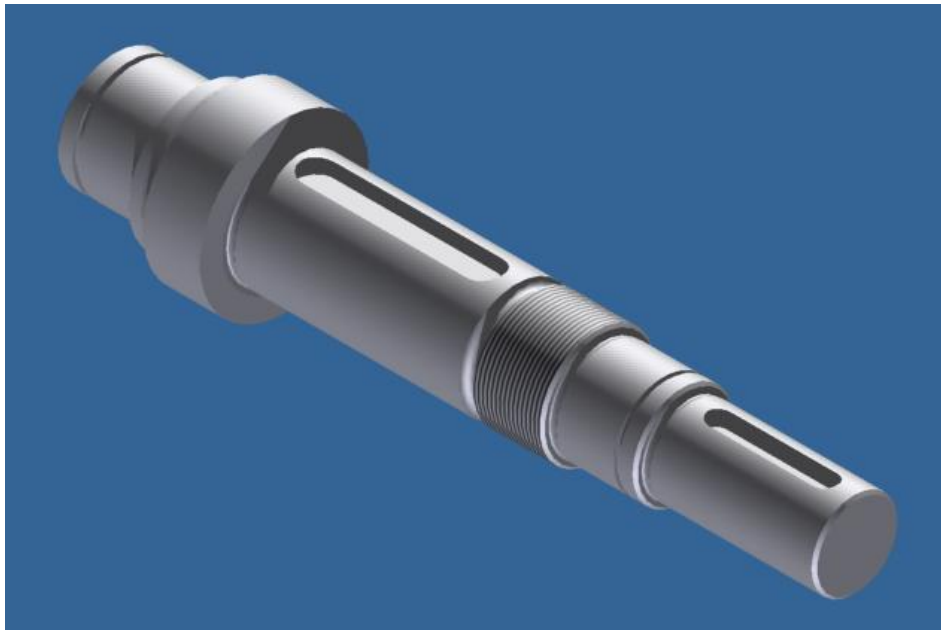


Abbildung II.16: Mustergetriebewelle

II.1.4.2 Vorbereitende Schritte zur Strömungssimulation

Im ersten Schritt wird - als Grundlage für die Simulation der Strömungsverhältnisse im Saugwerkzeug bzw. Luftspalt - der Luftspalt, also der Raum zwischen der Innenkontur des Saugwerkzeugs und der Oberfläche des zu reinigenden Bauteils, zu einem Volumenkörper abgeleitet.

Dazu wird zunächst die Mustergetriebewelle mit Hilfe der Konstruktionssoftware Autodesk Inventor 2010 konstruktiv um das Maß des geforderten Luftspalts (ca. zwei bis drei Millimeter) vergrößert. Hierdurch wird beim späteren konstruktiven Subtrahieren der Mustergetriebewelle vom Saugwerkzeug-Rohling (siehe unten) der um den Luftspalt vergrößerte Hohlraum im Saugwerkzeug erzeugt.

Des Weiteren wird die Mustergetriebewelle um Passfedernuten, Sicherungsringnuten, Außengewinde und vergleichbare Elemente vereinfacht (vgl. Abbildung II.17), da diese andernfalls durch das konstruktive Subtrahieren verfahrensbedingt als Ausstülpungen auf der Innenkontur des Hohlraums im Saugwerkzeug erscheinen würden. Lokale Bereiche ohne Luftspalt zwischen Welle und Saugwerkzeug wären die Folge, was einer möglichst realitätsnahen Abbildung bzw. Ableitung des Luftspalts als Volumenkörper entgegenstehen würde.

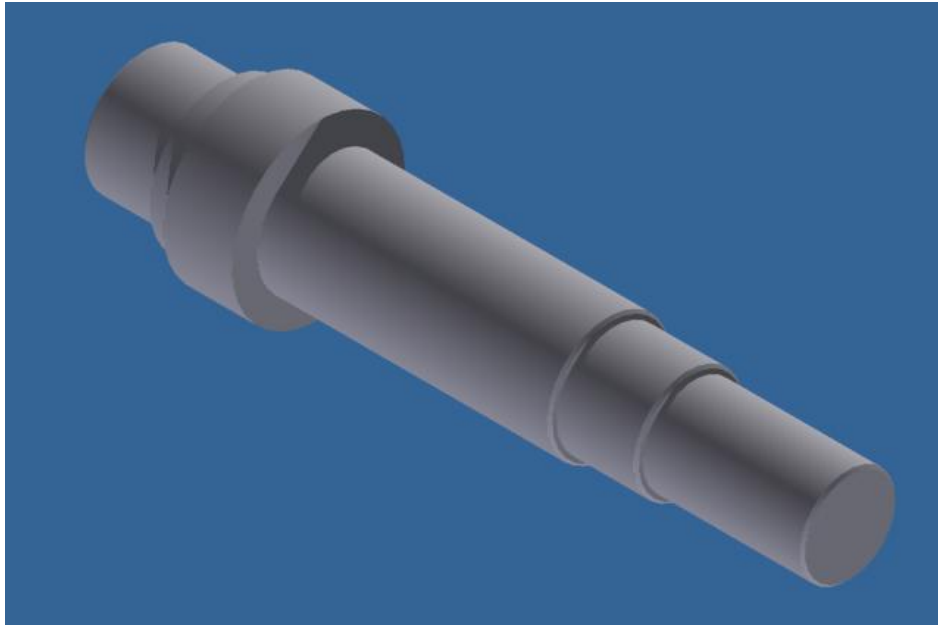


Abbildung II.17: Mustertriebwellen - vergrößert und vereinfacht

Im nächsten Schritt wird die vergrößerte und vereinfachte Mustertriebwellen im so genannten Saugwerkzeug-Rohling - hierbei handelt es sich um die Rohform des späteren Saugwerkzeugs - platziert und von diesem durch konstruktive Subtraktion abgezogen. Ergebnis dieser Subtraktion ist das in Abbildung II.18 dargestellte, um den Luftspalt vergrößerte Saugwerkzeug mit Hohlraum.

Als nächstes wird das spätere Saugwerkzeug mit Hilfe der 3D-CAD-Software in Wellenebene in eine obere und in eine untere Saugwerkzeughälfte geteilt und es werden konstruktiv Ansaugöffnungen in die obere Saugwerkzeughälfte und Absaugöffnungen in die untere Saugwerkzeughälfte eingebracht. Hierbei ist zu betonen, dass sowohl die Lage als auch die Position und die Anzahl der Ansaug- und Absaugöffnungen in den beiden Saugwerkzeughälften zu diesem Zeitpunkt lediglich mit Augenmaß gewählt werden. Die bezüglich hinreichend guter Reinigungsergebnisse optimale Anordnung der Saugöffnungen wird erst aus den Ergebnissen der Strömungssimulation, wenn nötig in mehreren Schritten, iterativ abgeleitet. Abbildung II.19 zeigt beispielhaft die untere, nicht optimierte Saugwerkzeughälfte mit zwei Absaugöffnungen. Die beiden Absaugöffnungen sind durch eine Absaugleitung miteinander verbunden, welche dazu dienen soll, die Absaugströmung über das zu reinigende Bauteil zu verteilen.

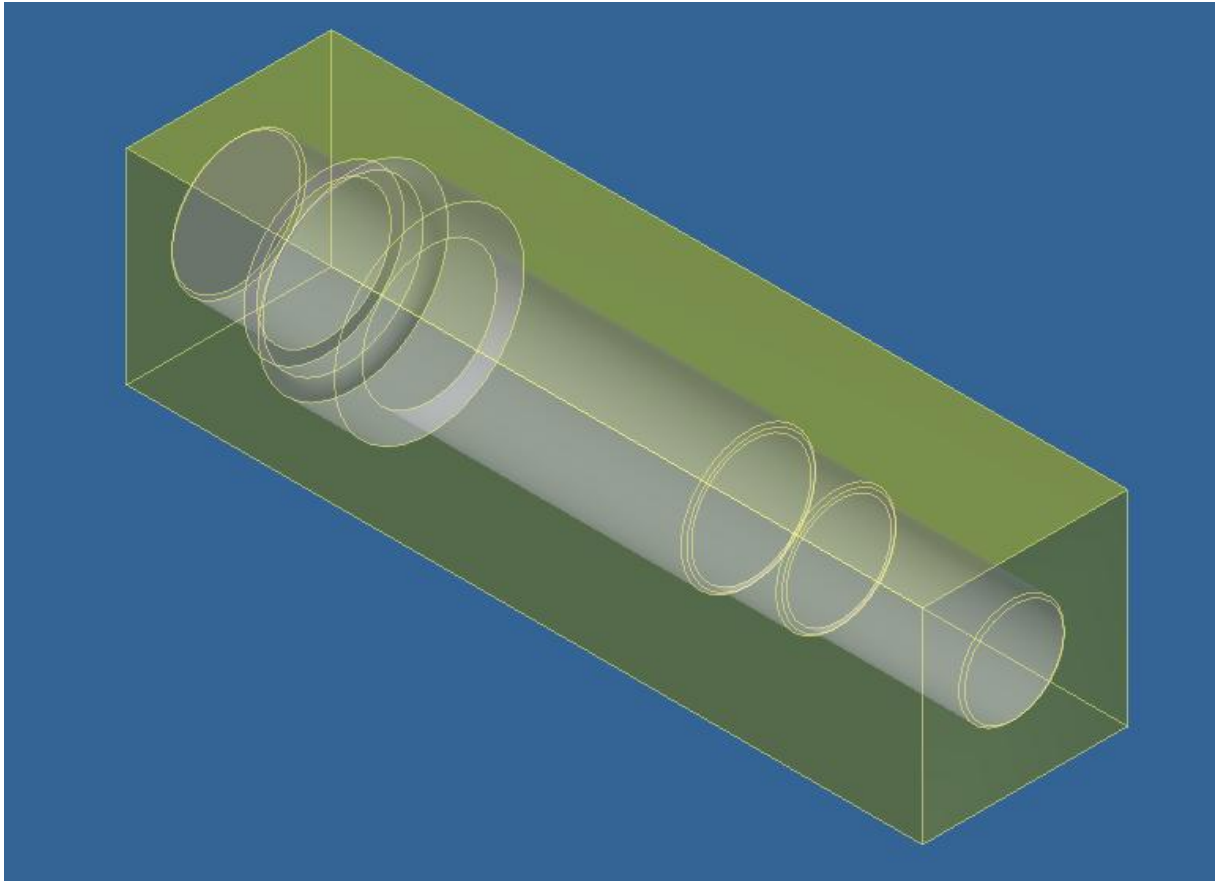


Abbildung II.18: Saugwerkzeug mit Hohlraum

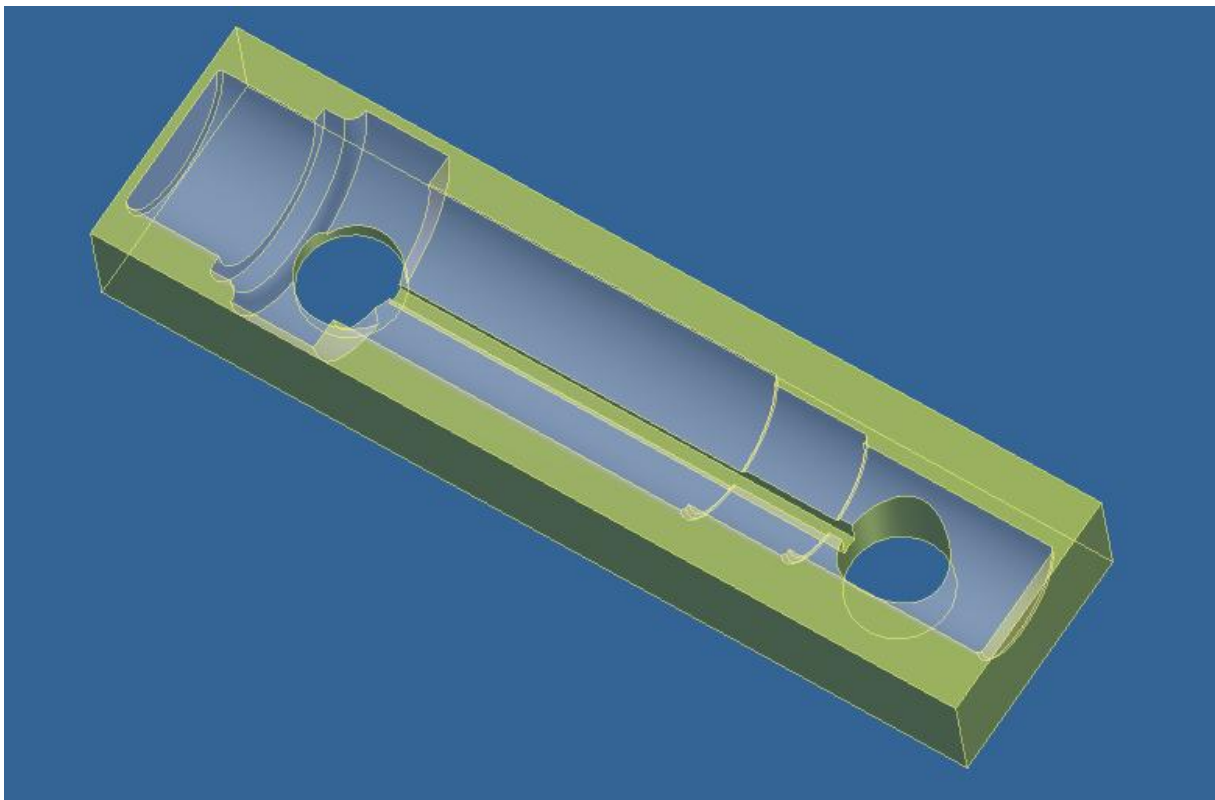


Abbildung II.19: Untere Saugwerkzeughälfte mit Absaugöffnungen

Der letzte Schritt zur Ableitung des Luftspalt-Volumenkörpers besteht darin, dass konstruktiv eine Baugruppe aus den beiden Saugwerkzeughälften und dem zu reinigenden Bauteil im Originalzustand gebildet wird. Diese Baugruppe wird anschließend vom Saugwerkzeug-Rohling abgezogen (vgl. Abbildung II.20).

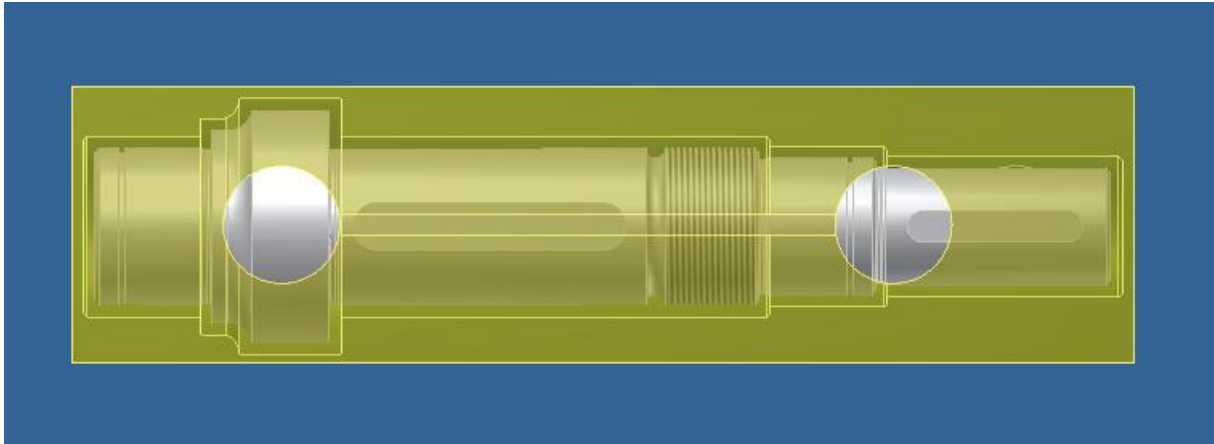


Abbildung II.20: Baugruppe aus Saugwerkzeughälften und Bauteil im Originalzustand

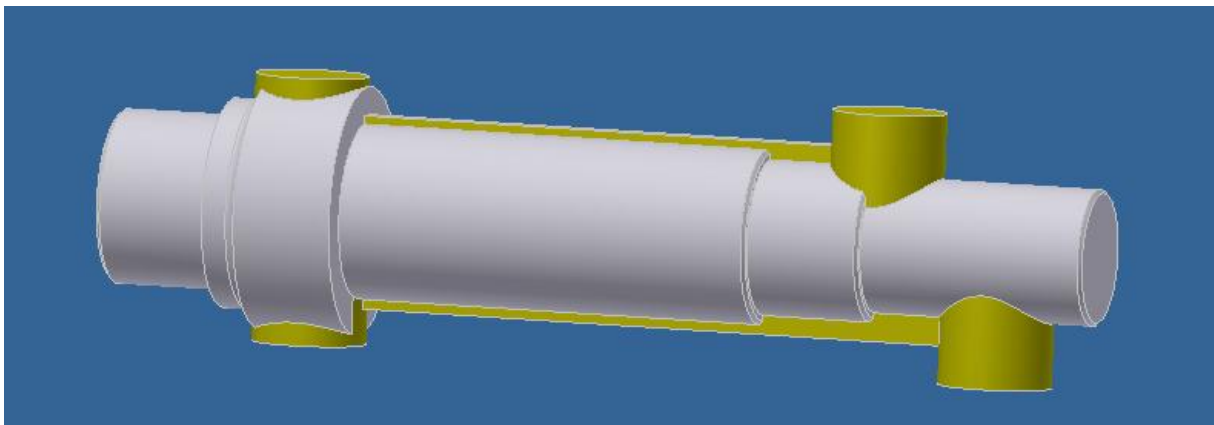


Abbildung II.21: Luftspalt-Volumenkörper

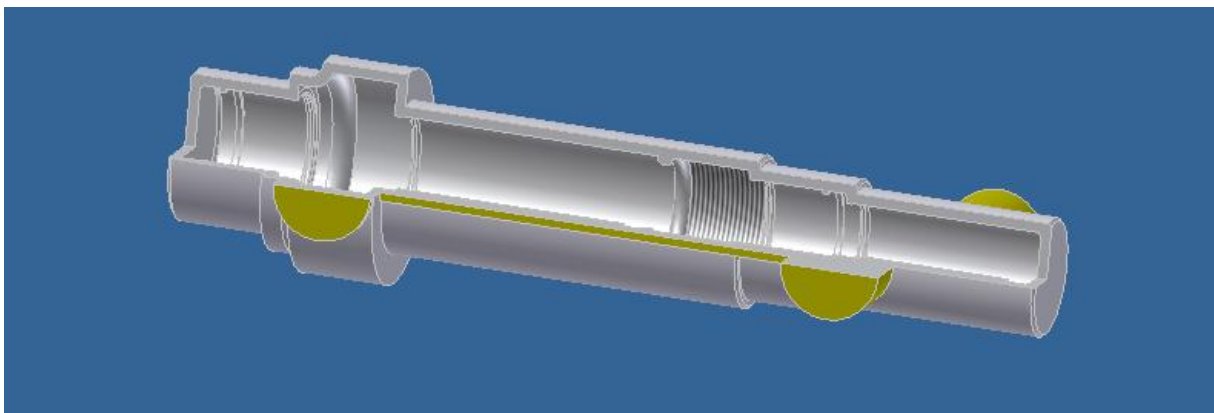


Abbildung II.22: Luftspalt-Volumenkörper im Teilschnitt

Abbildung II.21 und Abbildung II.22 zeigen den Luftspalt-Volumenkörper und den Luftspaltvolumenkörper im Teilschnitt als Ergebnis der oben beschriebenen Subtraktion. Die Grundlage für die im Folgenden beschriebene Simulation der Strömungsverhältnisse im Luftspalt ist damit geschaffen.

II.1.4.3 Simulation der Strömungsverhältnisse im Luftspalt

Nachdem der Bereich zwischen der Innenkontur des Saugwerkzeugs und der Oberfläche des zu reinigenden Bauteils, der Luftspalt, als Volumenkörper abgeleitet werden konnte, wird dieser zunächst simulationsvorbereitend vernetzt. Das heißt, der Luftspalt-Volumenkörper wird als Berechnungsgrundlage der späteren Simulation mit Hilfe der Vernetzungssoftware ICEM CFD in eine diskrete Anzahl finiter Volumen unterteilt (vgl. Abbildung II.23).

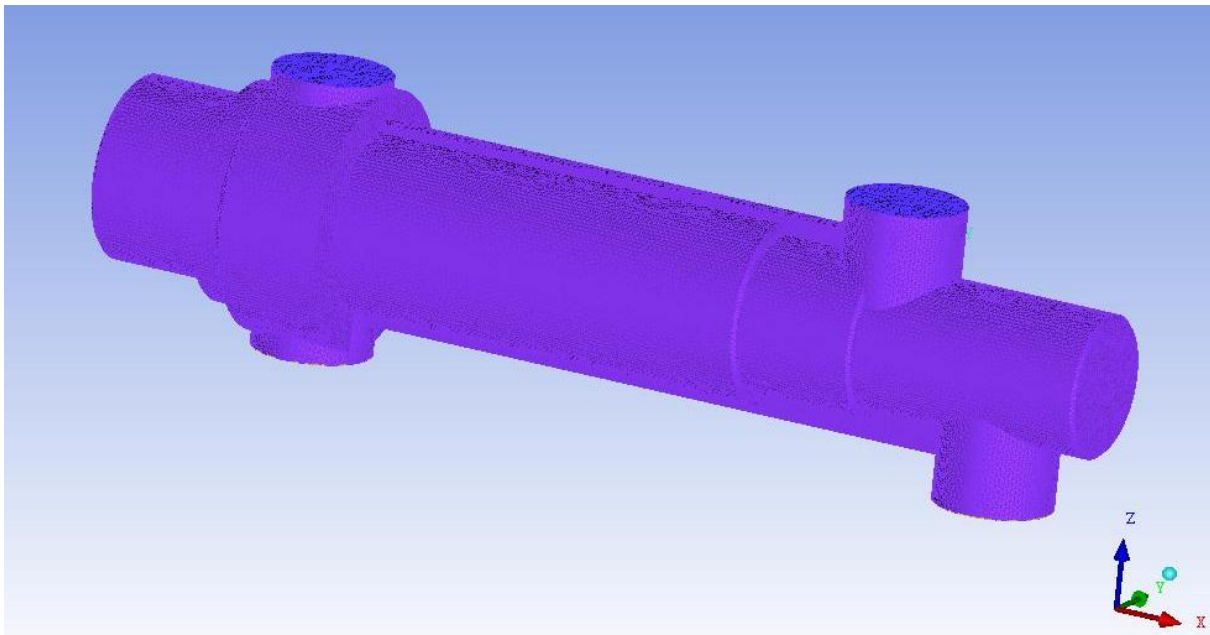


Abbildung II.23: Vernetzter Luftspalt-Volumenkörper

Mit Hilfe der Strömungssimulationssoftware ANSYS CFX 12.0 wird anschließend das zu berechnende Strömungsproblem definiert, indem spezifische Bereiche des Luftspalt-Volumenkörpers, wie beispielsweise die Öffnungen und die den Luftspalt begrenzenden Wände, die Oberfläche des zu reinigenden Bauteils und die Innenkontur des Saugwerkzeugs, voneinander abgegrenzt werden.

Dabei werden im oberen Bereich des Luftspalts die Ansaugöffnungen festgelegt, durch die die Umgebungsluft angesaugt wird. Außerdem werden im unteren Bereich des Luftspalts die Absaugöffnungen bestimmt, an denen die Absaugströmung bzw. ein Unterdruck erzeugt wird. Dies geschieht, indem ein Differenzdruck zwischen den Ansaug- und Absaugöffnungen definiert wird (vgl. Abbildung II.24).

Basierend auf den oben genannten Definitionen des Strömungsproblems werden schließlich die strömungsmechanischen Vorgänge im Luftspalt simuliert, in dem die Grundgleichungen

der Strömungsmechanik anhand der bei der Vernetzung erzeugten finiten Volumen numerisch berechnet werden.

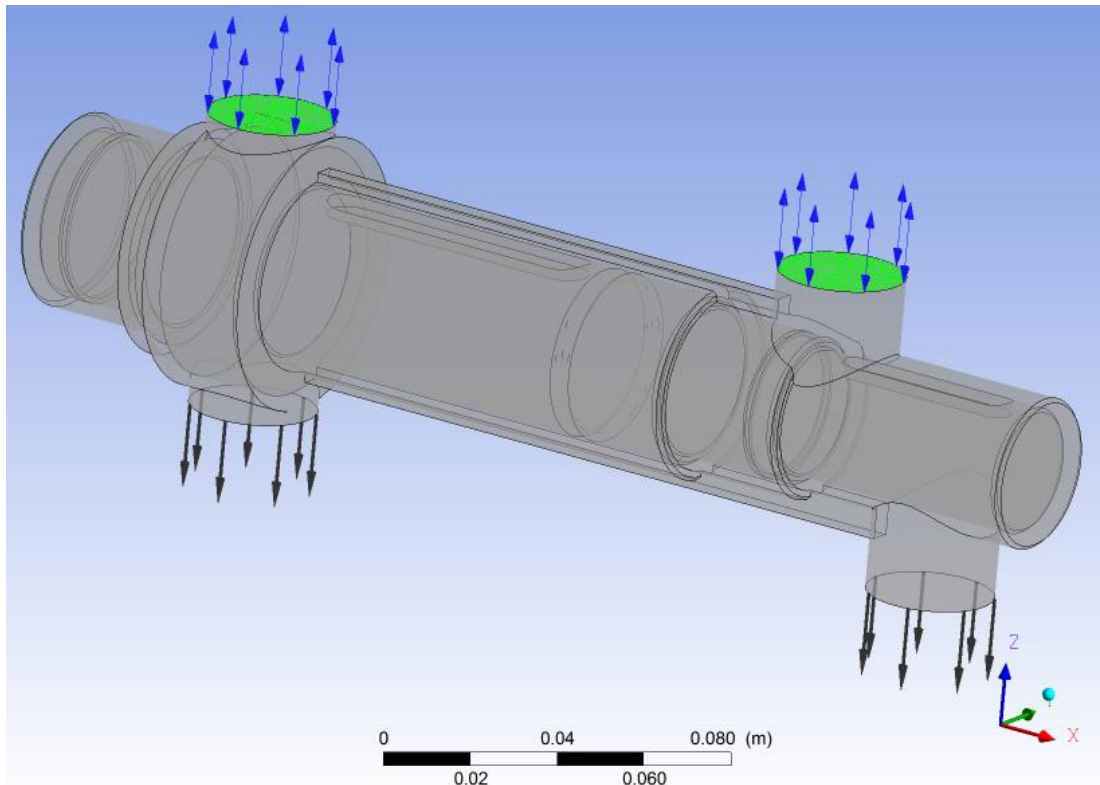


Abbildung II.24: Definition des Strömungsproblems

Abbildung II.25 visualisiert die Verteilung der Wandschubspannungen im Luftspalt bzw. auf der Bauteiloberfläche als erstes wichtiges reinigungs- und optimierungsrelevantes Ergebnis der Strömungssimulation.

Wandschubspannungen sind durch die Absaugströmung hervorgerufene Kräfte, welche die Ablösung flüssiger und fester Verunreinigungen wie beispielsweise Partikel unterstützen. In den rot eingefärbten Bereichen sind diese relativ hoch und damit tendenziell reinigungswirksam. In den blauen Bereichen sind diese hingegen relativ niedrig und damit tendenziell reinigungsunwirksam.

Es lässt sich somit aus dem in Abbildung II.25 dargestellten Ergebnis der Strömungssimulation ein deutlicher Optimierungsbedarf vor allem im mittleren und linken Bereich des Saugwerkzeugs bzw. Luftspalts erkennen.

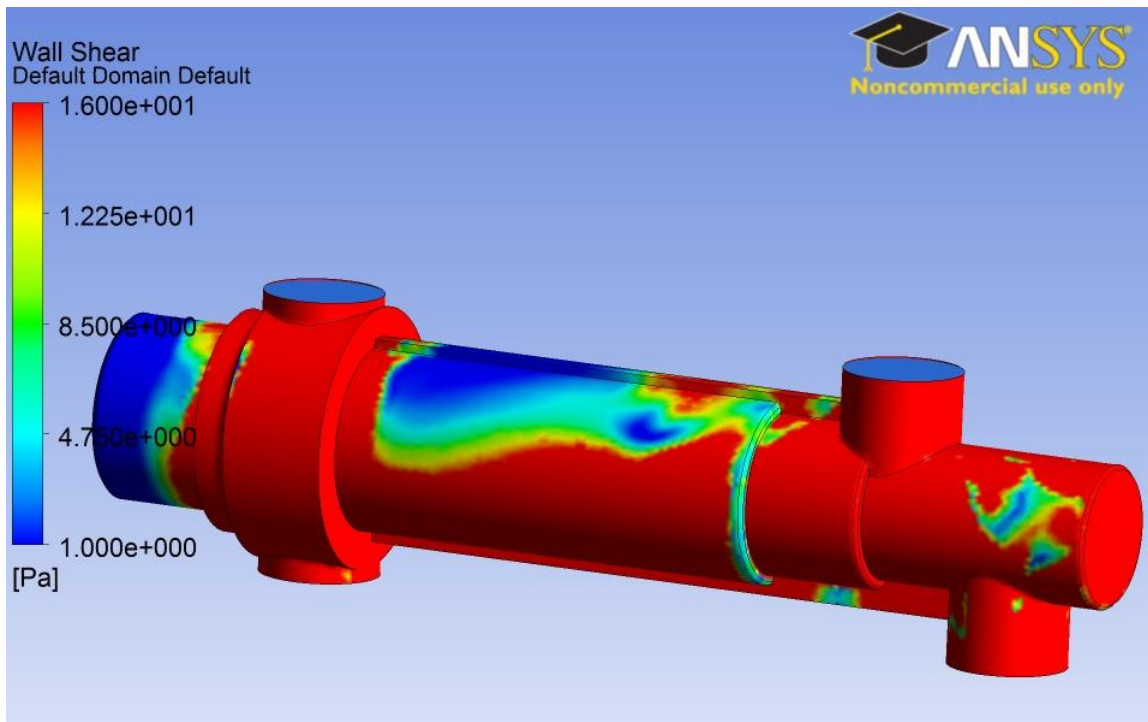


Abbildung II.25: Verteilung der Wandschubspannungen im Luftspalt

Abbildung II.26 visualisiert die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit durch Stromlinien im Luftspalt bzw. im Saugwerkzeug als zweites wichtiges reinigungs- und optimierungsrelevantes Ergebnis des Strömungssimulationsversuchs.

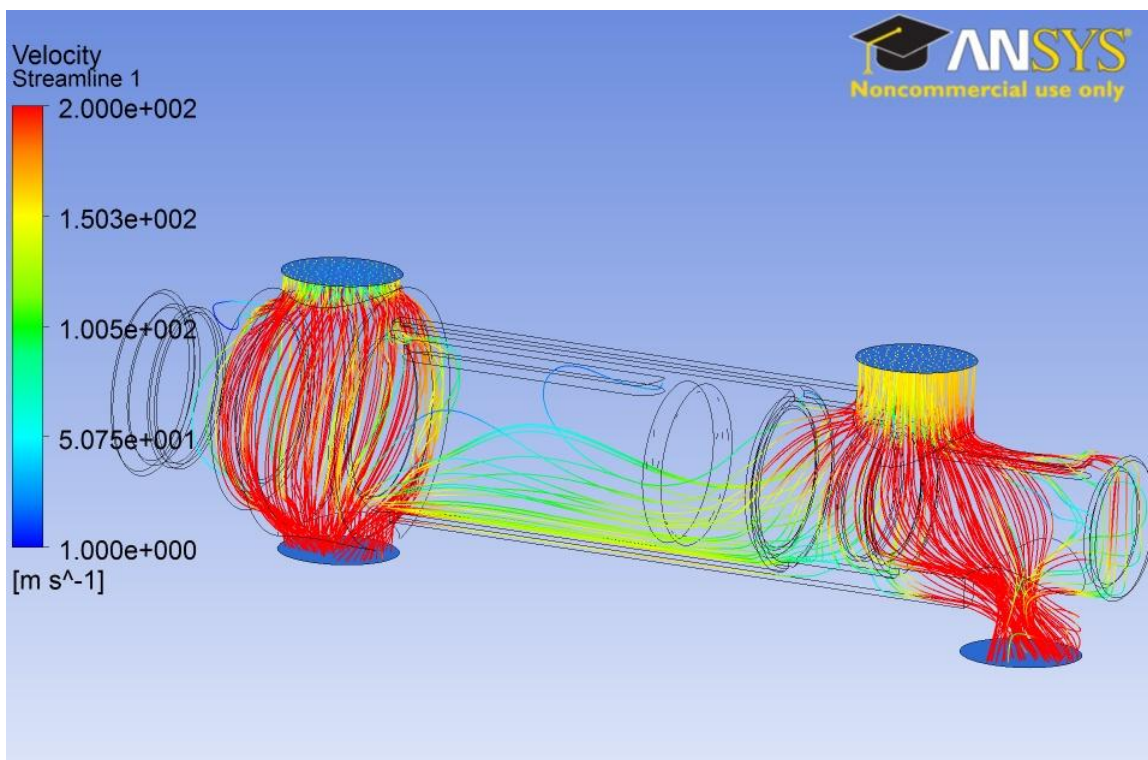


Abbildung II.26: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt

In den rot gefärbten Bereichen ist die Strömungsgeschwindigkeit relativ hoch. Dagegen ist die Strömungsgeschwindigkeit in den blau gefärbten Bereichen relativ niedrig. Die Bereiche, in denen keine oder nur wenig Stromlinien zu erkennen sind, werden durch die Absaugströmung nicht oder nur schlecht erfasst. Da das Ablösen der Verunreinigungen von der Bauteiloberfläche sowie der Abtransport der gelösten Verunreinigungen durch die Absaugströmung um so besser funktioniert, je höher die Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt ist, lässt sich aus Abbildung II.26 ebenfalls ein Optimierungsbedarf im mittleren und linken Bereich des Saugwerkzeugs bzw. des Luftspalts erkennen.

Nachdem die Auswertung der Simulationsergebnisse ergeben hat, dass die Strömungsverhältnisse im Luftspalt bzw. im Saugwerkzeug offenbar in Teilbereichen nicht reinigungsoptimal sind, erfolgt auf dieser Basis in einem nächsten Schritt die Optimierung des Saugwerkzeugs im mittleren Bereich. Dies geschieht mit dem Ziel, höhere Wandschubspannungen zu erzeugen, die Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die Absaugströmung gleichmäßiger im Luftspalt zu verteilen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Wandschubspannungen um so größer sind, je schneller das Fluid - im vorliegenden Fall die abgesaugte Luft - an der Bauteiloberfläche entlang strömt. Abbildung II.27 zeigt einen möglichen ersten Iterationsschritt zur Optimierung des Saugwerkzeugs.

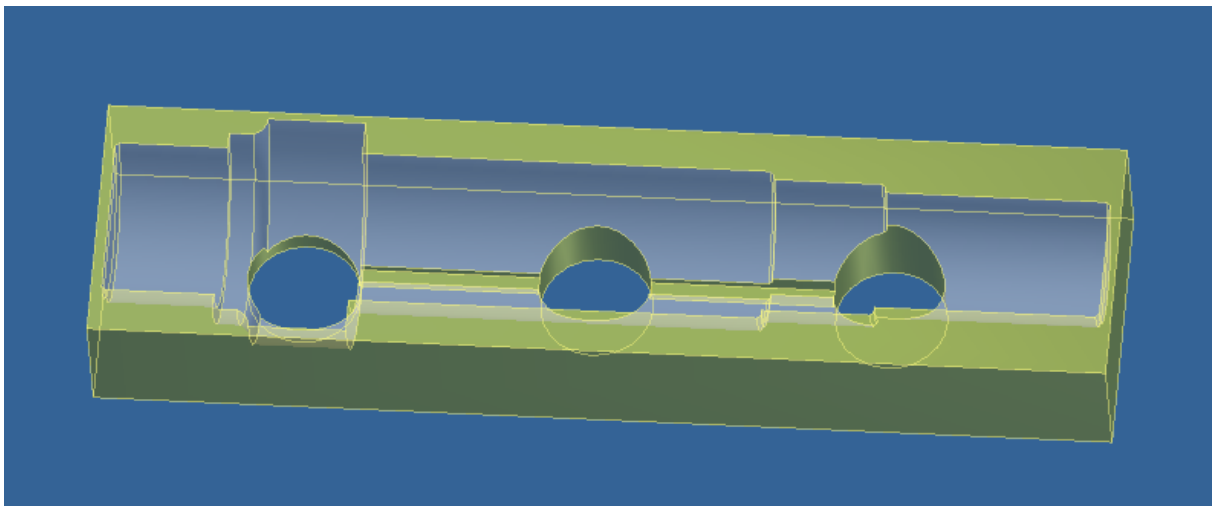


Abbildung II.27: Optimierung des Saugwerkzeugs (untere Hälfte)

Hier wurde in den mittleren Bereich der unteren Saugwerkzeughälfte eine zusätzliche Absaugöffnung eingebracht. Gleichmaßen wurde die obere Saugwerkzeughälfte mit einer zusätzlichen Ansaugöffnung versehen. Abbildung II.28 zeigt als Ergebnis eines erneuten Simulationsversuchs, wie sich diese Änderungen bzw. Optimierungsmaßnahmen auf die Verteilung der Wandschubspannungen im Luftspalt ausgewirkt haben.

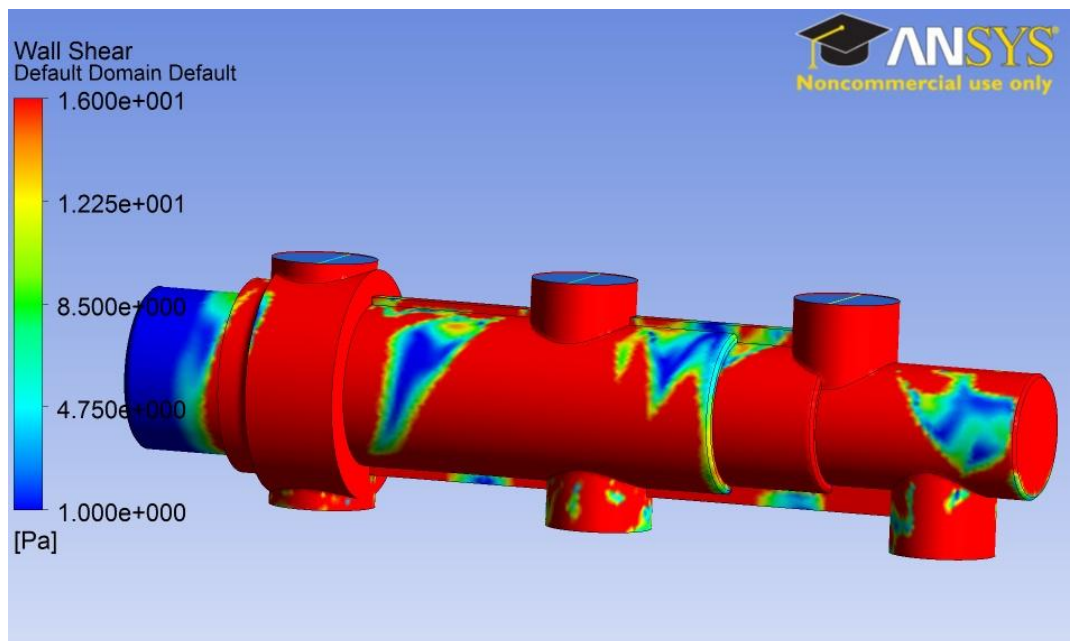


Abbildung II.28: Wandschubspannungen nach Einbringung zusätzlicher Saugöffnungen

Es ist gut zu erkennen, dass durch das Einbringen zusätzlicher Saugöffnungen in das Saugwerkzeug eine deutlich bessere Verteilung der Wandschubspannungen erreicht werden konnte. Erwartungsgemäß zeigt Abbildung II.29, dass auch die Verteilung der Absaugströmung im Saugwerkzeug klar verbessert werden konnte.

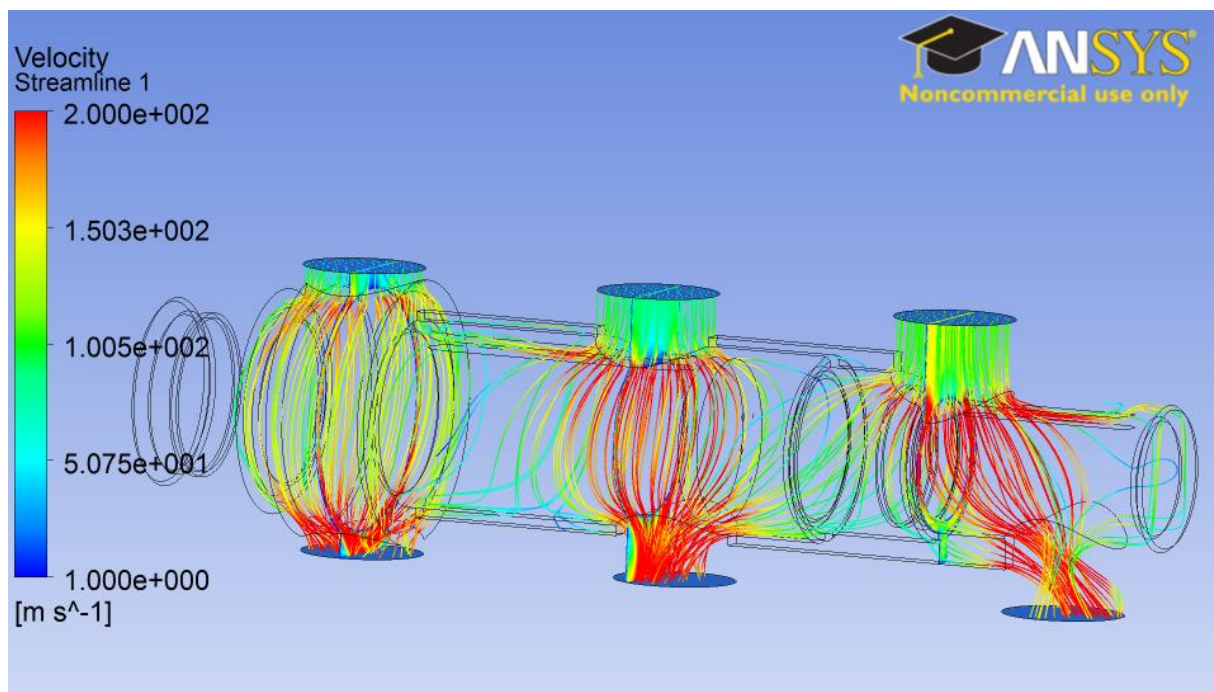


Abbildung II.29: Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt nach Einbringung zusätzlicher Saugöffnungen

Abbildung II.28 und Abbildung II.29 zeigen jedoch auch, dass die Optimierung des Saugwerkzeugs damit offenbar noch nicht vollständig abgeschlossen ist. Weitere Optimierungsschritte und -maßnahmen könnten beispielsweise darin bestehen, dass weitere Saugöffnungen in das

Saugwerkzeug eingebracht werden, die Gestalt der Saugöffnungen verändert wird, das Maß des Luftspalts verringert wird oder dass zusätzliche Saugleitungen vorgesehen werden.

In der oben beschriebenen Weise wird solange iterativ weiter vorgegangen, bis das Ergebnis des Strömungssimulationsversuchs ein hinreichend gutes Reinigungsergebnis erwarten lässt. Erst wenn dies der Fall ist, wird ein entsprechendes Saugwerkzeug hergestellt und in realen Reinigungsversuchen getestet.

II.1.4.4 Fused-Deposition-Modeling-Verfahren

Die Herstellung der oben vorgestellten, strömungsoptimierten, jedoch dadurch teilweise hochkomplexen Saugwerkzeuge ist mit dem ursprünglichen, manuellen Herstellungsverfahren nicht möglich. Bisher wurden die Saugbacken durch Abgießen der zu reinigenden Bauteile hergestellt. Dabei ist es nicht bzw. nur unter großem Aufwand möglich, Saugkanäle und Querverbindungen im Innern des Saugwerkzeugs zu erzeugen. Somit erfordern komplexe Saugwerkzeuge die Nutzung eines neuartigen Herstellungsverfahrens. Recherchen im Rahmen des Forschungsvorhabens führten zu dem 3D-Printing-Verfahren „Fused-Deposition-Modeling“, bei dem ein Bauteil vollautomatisch erstellt wird, indem drahtförmiger ABS-Kunststoff durch eine Düse extrudiert und in nahezu beliebiger Weise schichtweise aufeinander aufgetragen wird. Dieses spezielle 3D-Printing-Verfahren bietet im Gegensatz zu anderen Rapid-Prototyping-Verfahren den Vorteil, dass die erstellten Bauteile nicht nur als reine Anschauungsobjekte dienen, sondern darüber hinaus im Rahmen der physikalischen Grenzen von ABS-Kunststoff auch als funktionale Bauteile eingesetzt werden können.

Aufgrund der daraus resultierenden beachtlichen Bedeutung des Verfahrens für den Erfolg und die Verbreitung der Vibrationsreinigung - ohne ein 3D-Printing-Verfahren könnten lediglich Saugwerkzeuge für sehr einfache Bauteile gefertigt werden - wurde aus Mitteln des Fachgebiets Maschinenelemente ein Fused-Deposition-Modeling 3D-Printer beschafft. Nachdem die Erfahrungen im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt haben, dass sich sowohl das Fertigungsverfahren, als auch das ABS-Material für die Herstellung strömungsoptimierter, komplexer Saugwerkzeuge als geeignet erwiesen hat - über die Langzeiteignung und die Beständigkeit derart produzierter Bauteile im Dauereinsatz kann an dieser Stelle noch keine Aussage getroffen werden - verwendet nach Abschluss des Forschungsvorhabens nun auch die Firma vibro-tec einen hauseigenen Fused-Deposition-Modeling 3D-Printer zur Produktion der Saugwerkzeuge.

II.1.4.5 Simulationsversuche für eine PWK-Kurbelwelle

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ViReBa wurden vielzählige Strömungssimulationsversuche mit dem Ziel durchgeführt, bereits vor der Durchführung realer Reinigungsversuche zu ermitteln, ob ein Bauteil mit einer Vibrationsreinigungsanlage reinigbar ist. Des Weiteren

dienen die Simulationsversuche dazu, nach der in Abschnitt II.1.4.3 vorgestellten Methode strömungs- und damit reinigungsoptimierte Saugwerkzeuge herzustellen.

Die Untersuchung einer PKW-Kurbelwelle mit Hilfe der Strömungssimulation hat gezeigt, dass die Reinigung derartiger Bauteile nur bedingt möglich ist. Die entsprechenden Simulationsversuche auf Basis der Absaugvorrichtung der ursprünglichen Vibrationsreinigungsanlage machten deutlich, dass vor allem der Bereich der rotationsunsymmetrischen Kurbeln schwer reinigbar ist. In diesem Bereich stellte sich problematisch dar, dass das Anlegen einer Absaugströmung und damit das Erreichen hoher Wandschubspannungen und einer gleichmäßig schnellen Umströmung der Kurbeln bei gegebener Anordnung der Absaugvorrichtung nicht erreicht werden konnte.

Praktische Reinigungsversuche mit einer Vibrationsreinigungsanlage in der Version vor Projektbeginn haben die Ergebnisse der Simulationsversuche eindeutig bestätigt: Der Bereich der Kurbeln konnte nicht vollständig von den flüssigen und festen Verunreinigungen befreit werden, während der restliche Bereich des Bauteils augenscheinlich zufriedenstellend gereinigt werden konnte. Eine quantitative Untersuchung des Reinigungsergebnisses war nicht möglich, da zum Zeitpunkt der Versuche noch kein Restschmutzanalyselabor vorhanden war.

Da sowohl die Simulationsversuche als auch die realen Reinigungsversuche übereinstimmend gezeigt haben, dass gute Reinigungsergebnisse hauptsächlich im direkten Einflussbereich der Ansaug- und Absaugöffnungen erzielt werden konnten, die Kurbeln jedoch außerhalb dieses Einflussbereichs lagen (vgl. Abschnitt II.1.4), lag die Vermutung nahe, dass die reinheitsanforderungsgerechte Reinigung eines solchen Bauteils mit Hilfe der Vibrationsreinigung nur möglich ist, wenn parallel zur strömungsmechanischen Optimierung des Saugwerkzeugs auch eine Anpassung der Absaugvorrichtung der ursprünglichen Vibrationsreinigungsanlage erfolgt.

Aus diesem Grunde wurde, losgelöst von der Absaugvorrichtung der ursprünglichen Vibrationsreinigungsanlage virtuell, mit Hilfe weiterer Simulationsversuche, untersucht, wie es sich auswirkt, wenn die Ansaug- und Absaugöffnungen unmittelbar ober- und unterhalb der Kurbeln angeordnet werden.

Die Ergebnisse dieser Versuche haben gezeigt, dass die Reinigungsleistung des Verfahrens, nachdem die Absaugvorrichtung und das Saugwerkzeug an die Problemzonen bzw. die spezifischen Besonderheiten des zu reinigenden Bauteils angepasst worden sind, deutlich verbessert werden konnte.

Auf die Darstellung der Simulationsergebnisse muss an dieser Stelle auf Grund von Geheimhaltungsvereinbarungen verzichtet werden.

II.1.4.6 Simulationsversuche für eine LKW-Vorgelegewelle

Neben der Durchführung von Simulationsversuchen mit der PKW-Kurbelwelle wurde in einem weiteren Fall die Reinigung der Vorgelegewelle eines LKW-Getriebes simuliert. Die auf der

ursprünglichen Absaugvorrichtung der Reinigungsanlage basierenden Strömungssimulationsversuche für dieses Bauteil haben gezeigt, dass alle Bereiche der Welle gleichmäßig und mit hoher Geschwindigkeit umströmt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Vorgelegewelle mit Hilfe des Vibrationsreinigungsverfahrens sehr gut reinigbar ist im Gegensatz zur PKW-Kurbelwelle offenbar sogar in der ursprünglichen Bauform. Dies findet seine Begründung darin, dass Getriebewellen weitestgehend rotationssymmetrisch sind und in der Regel über keine besonders großen Durchmesserunterschiede verfügen. Dadurch ist es relativ leicht, die Absaugströmung an das zu reinigende Bauteil anzulegen und damit eine gute Umströmung bzw. Abreinigung zu erreichen.

Auf die Darstellung der Simulationsergebnisse muss an dieser Stelle auf Grund von Geheimhaltungsvereinbarungen verzichtet werden.

II.1.4.7 Optimierung der Absaugvorrichtung

Es hat sich gezeigt, dass die Erfüllung definierter Reinheitsanforderungen bei vergleichsweise komplizierten Geometrien, wie beispielsweise PKW-Kurbelwellen, allein durch die strömungsmechanisch optimale Gestaltung bzw. Konstruktion des Saugwerkzeugs nur bedingt bzw. gar nicht erreicht werden kann, wenn nicht gleichzeitig die Absaugvorrichtung der Vibrationsreinigungsanlage entsprechend angepasst wird.

In ihrer ursprünglichen Form sind die Ansaugöffnungen im oberen und unteren Bereich der Absaugvorrichtung so angeordnet, dass eine Justierbarkeit bzw. Variabilität ihrer Lage in Wellen-Längsrichtung praktisch unmöglich ist. Die Justierbarkeit und Variabilität der An- und Absaugöffnungen in der Absaugvorrichtung und damit auch im Saugwerkzeug ist jedoch von entscheidender Bedeutung:

Die Ergebnisse der Strömungssimulationsversuche haben gezeigt, dass die größte Reinigungswirkung im unmittelbaren Einflussbereich der An- und Absaugöffnungen erzielt werden kann. Diese Erkenntnis bedeutet, dass die An- und Absaugöffnungen optimal ober- und unterhalb schwer zu reinigender Bauteilregionen anzuordnen sind. Bei der Untersuchung der Kurbelwelle haben sich zum Beispiel vor allem die Bereiche der rotationsunsymmetrischen Kurbeln als besonders schwer reinigbar erwiesen.

Die bauteilspezifische Anpassung der Absaugvorrichtung bzw. der Vibrationsreinigungsanlage im Sinne einer anforderungsgerechten Reinigung ist mit der ursprünglichen Form der Vibrationsreinigungsanlage nur sehr begrenzt bzw. gar nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Absaugvorrichtung in zwei Entwicklungsschritten entsprechend angepasst. Im ersten Schritt wurde zunächst die Absaugvorrichtung im Bereich der oberen Saugwerkzeughälfte angepasst. Während die Ansaugöffnungen bzw. Schieber ursprünglich in fester Lage im Deckelblech (vgl. Abbildung II.30) positioniert waren, werden diese nun unmittelbar, in die durch das entsprechende Bauteil vorgegebene Lage, auf der oberen Saugwerkzeughälfte fixiert.

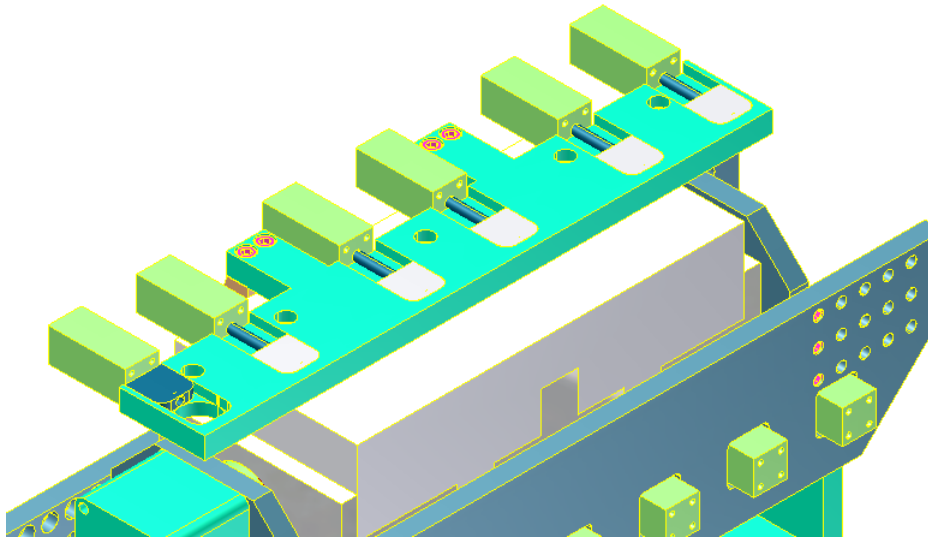


Abbildung II.30: Ursprüngliche Absaugvorrichtung (oben)

Da das Deckelblech hierdurch entfällt, wurde die Schließfunktion in der aktuellen Bauweise der Firma vibro-tec durch einen umlaufenden Rahmen realisiert (vgl. Abbildung II.31).

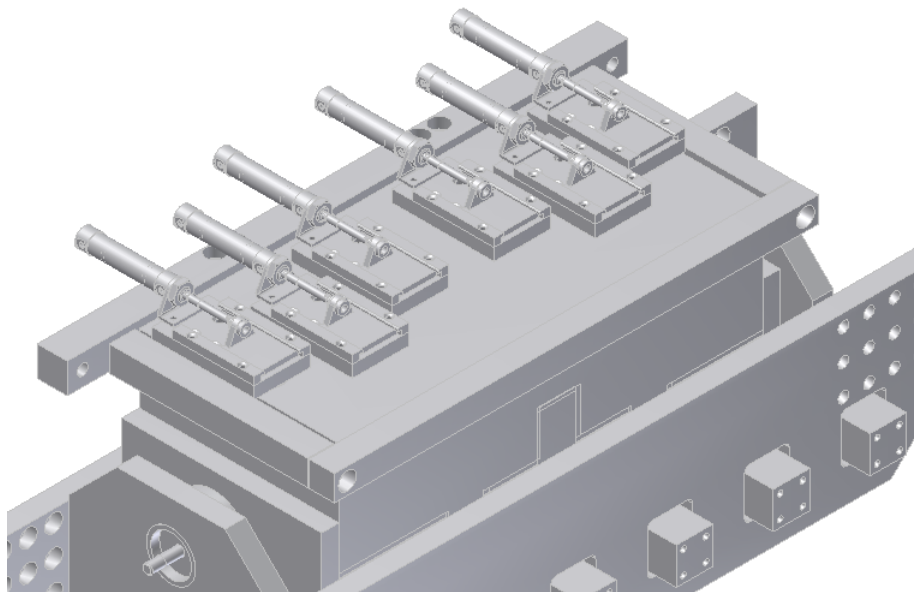


Abbildung II.31: Neue Absaugvorrichtung (oben)

Im zweiten Entwicklungsschritt wurde die Absaugvorrichtung im Bereich der unteren Saugwerkzeughälfte verändert. Abbildung II.32 zeigt diese in ihrer ursprünglichen Bauform.

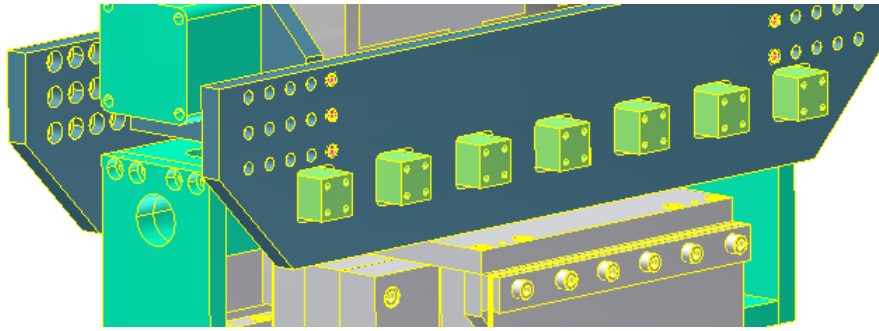


Abbildung II.32: Ursprüngliche Absaugvorrichtung (unten)

Unterhalb und in Längsrichtung des Saugwerkzeugs verläuft der zentrale Absaugkanal, welcher über Bohrungen die Verbindung zu den Absaugöffnungen der unteren Saugwerkzeughälfte schafft. Mit Hilfe von Zylindern ist es möglich, die Bohrungen bzw. die Verbindung zwischen Absaugkanal und Saugwerkzeug voneinander unabhängig zu öffnen und zu schließen. Die Lage der Bohrungen in Längsrichtung ist hier fest vorgegeben.

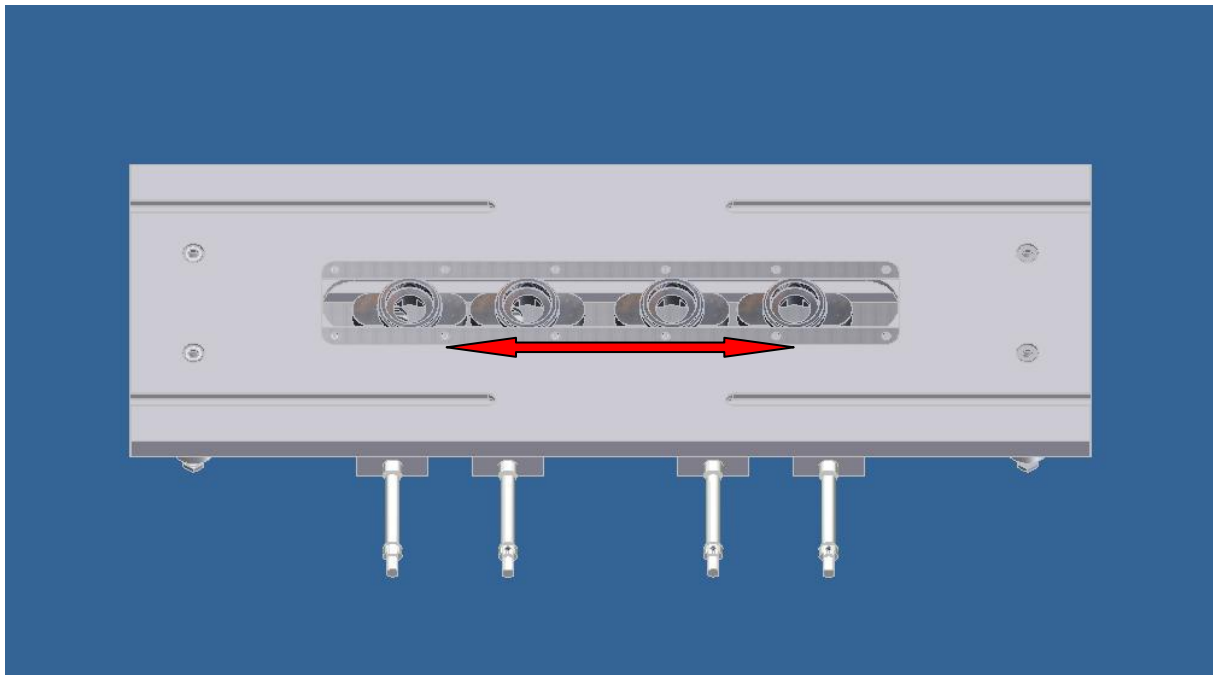


Abbildung II.33: Absaugvorrichtung der Versuchsanlage

Abbildung II.33 zeigt die Weiterentwicklung des unteren Bereichs der direkt in den Schwingtisch integrierten Absaugvorrichtung, wie sie im Versuchsstand (vgl. Abschnitt II.1.5) realisiert wurde. Durch die in einem Langloch angeordneten, verschiebbaren Stutzen kann die Lage bzw. der Einflussbereich der Absaugöffnungen in Längsrichtung des Saugwerkzeugs variiert werden. Somit ist es möglich, die Absaugöffnungen dort zu positionieren, wo es im Sinne eines optimalen Reinigungsergebnisses am vorteilhaftesten ist - im Fall der PKW-Kurbelwelle unmittelbar unterhalb der Kurbeln.

II.1.4.8 Fluid-Struktur-Kopplung

Bei der Formulierung des dritten Arbeitspakets wurde in Betracht gezogen, eine so genannte Fluid-Struktur-Kopplung (FSI) mit Hilfe der Software ANSYS 12.0 vorzunehmen, um damit - im Hinblick auf die Reinigungswirkung des Verfahrens - einerseits die Beeinflussung des schwingenden Bauteils durch das Fluid (die Absaugströmung) im Luftspalt und andererseits die Beeinflussung des Fluids durch das schwingende Bauteil untersuchen zu können.

Folgende Überlegungen standen der Durchführung einer Fluid-Struktur-Kopplung jedoch entgegen:

Auch ohne die Durchführung einer FSI lässt sich abschätzen, dass aufgrund der - im Vergleich mit beispielsweise Wasser oder Öl - sehr geringen Reibwirkung der strömenden Luft davon ausgegangen werden kann, dass das schwingende Bauteil durch die Absaugströmung nur in sehr geringem und damit vernachlässigbarem Maße beeinflusst wird.

Des Weiteren lässt sich auch ohne die Durchführung einer FSI abschätzen, inwiefern die Absaugströmung im Luftspalt durch das schwingende Bauteil beeinflusst wird: es kann davon ausgegangen werden, dass durch das schwingende Bauteil die für die Reinigungswirkung des Verfahrens relevante Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt parallel zur Längsachse des zu reinigenden Bauteils alternierend zu- und abnimmt. Das heißt, aufgrund des Vor- und Zurückschwingens führt die lokale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im vorderen Bereich des Luftspalts zwangsläufig zu einer lokalen Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit im hinteren Bereich des Luftspalts (vgl. Abbildung II.34). Aufgrund dieses Umstands heben sich die lokalen Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeit insgesamt gegenseitig auf und wirken sich daher nicht nennenswert reinigungsrelevant aus.

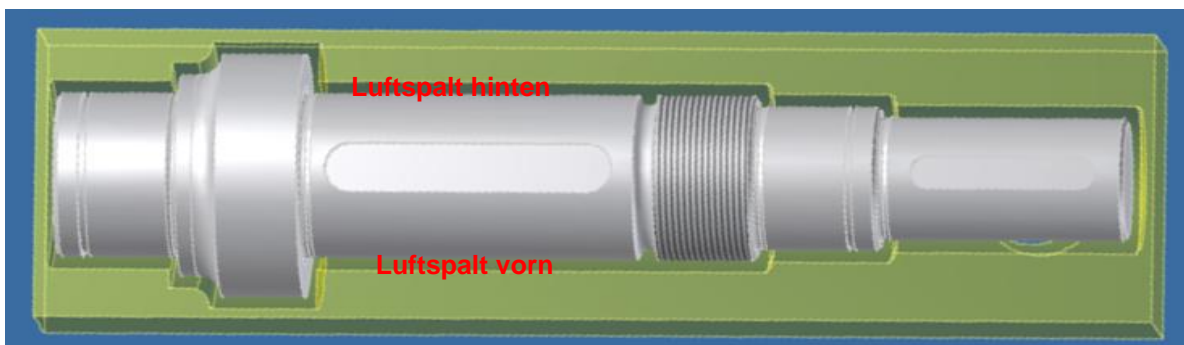


Abbildung II.34: Zu- und Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit im Luftspalt

Letztlich wäre die Durchführung einer Fluid-Struktur-Kopplung sehr zeit- und arbeitsaufwendig gewesen. Laut Support der ANSYS-Vertriebsfirma CADFEM würde ein spezialisierter Experte für eine die Vibrationsreinigung realitätsnah widerspiegelnde FSI mindestens drei Wochen benötigen. Hinsichtlich dieser Einschätzung wurde entschieden, dass der zu erwartende Nutzen bzw. die Aussagekraft der FSI bezüglich der reinigungsrelevanten Größen des Verfahrens als deutlich zu gering gesehen wird und damit in keinem Verhältnis zum erwarteten Aufwand steht. Auf die Durchführung einer FSI wurde daher verzichtet.

II.1.4.9 Modalanalyse

In einem weiteren Abschnitt wurde mit Hilfe der so genannten Modalanalyse untersucht, inwiefern durch Resonanzfrequenzen im zu reinigenden Bauteil eine positive Beeinflussung der Reinigungsleistung zu erwarten ist. Resonanzfrequenzen treten auf, wenn ein Bauteil mit seiner Eigenfrequenz angeregt wird, und führen zu deutlich erhöhten Amplituden. Diese könnten beim Bauteil potenziell zu einer verbesserten Ablösung von Verunreinigungen führen.

Das Vibrationsreinigungsverfahren arbeitet in einem Frequenzbereich zwischen 20 und 100 Hz. Die mit Hilfe der Software ANSYS 12 durchgeführten Modalanalysen haben jedoch gezeigt, dass die Eigenfrequenzen sowohl der PKW-Kurbelwelle als auch der LKW-Vorgelegewelle erst bei deutlich höheren Frequenzen liegen (vgl. Tabelle II.1). Gleiches gilt für die Mustertriebewelle. Aus dem Auftreten von Resonanzfrequenzen resultierende und dadurch verstärkte Reinigungseffekte sind daher im Rahmen der Vibrationsreinigung nicht zu erwarten.

Tabelle II.1: Eigenfrequenzen

Mode	PKW-Kurbelwelle [Hz]	LKW-Vorgelegewelle [Hz]	Mustertriebewelle [Hz]
1	400,2	1408,8	2041,1
2	433,63	1408,9	2067,5
3	568,74	2851,3	4966,4
4	914,99	3820,3	5054,2
5	1003,4	3820,6	5142,7

II.1.5 Tests der konstruktiven Änderungen an Versuchsanlagen

Bei der Formulierung des vierten Arbeitspakets wurde ursprünglich davon ausgegangen, dass an der TU Dortmund eine Versuchsanlage aufgebaut wird, die durch die vibro-tec GmbH zur Verfügung gestellt werden sollte. An dieser Vibrationsreinigungsanlage sollten Versuche durchgeführt werden, die die Ergebnisse der Simulationsversuche prototypisch umsetzen und verifizieren sollten. Außerdem sollten die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten konstruktiven Änderungen an der Versuchsanlage realisiert werden und damit zu einer Optimierung des Reinigungsverfahrens führen.

Aufgrund der wirtschaftlich stark angespannten Lage des vergangenen Jahres war es der vibro-tec GmbH jedoch nicht möglich, eine Versuchsanlage zur Verfügung zu stellen. Weder die Verifizierung der Simulationsergebnisse noch die Optimierung der Vibrationsreinigungsanlage konnten daher an der TU Dortmund durchgeführt werden.

Stattdessen wurden sowohl die Versuche zur Verifizierung der Simulationsergebnisse als auch die optimierenden konstruktiven Änderungen an einer bereits existierenden Versuchsan-

lage bei der vibro-tec GmbH durchgeführt. Dabei liefen die durchgeführten Reinigungsversuche nach dem folgenden Muster ab:

Zunächst wurde das Bauteil, beispielsweise die PKW-Kurbelwelle, in einem konventionell hergestellten Saugwerkzeug gereinigt. Konventionell hergestellt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Werkzeug abgegossen wurde und nicht auf den Ergebnissen der Strömungssimulation beruhte. Nach erfolgtem Reinigungsversuch wurde die Reinigungsgüte mit Augenmaß bzw. durch Ertasten der Restverschmutzung bzw. des Restölfilms auf dem gereinigten Bauteil qualitativ bewertet.

In nächsten Schritt wurde dasselbe zu reinigende Bauteil in einem strömungsmechanisch optimierten, mit Hilfe eines 3D-Printers hergestellten Saugwerkzeug, gereinigt. Auch nach diesem Reinigungsversuch wurde zunächst die Reinigungsgüte mit Augenmaß bzw. durch Ertasten der Restverschmutzung bzw. des Restölfilms auf dem gereinigten Bauteil bewertet. Das auf diese Weise erlangte Ergebnis wurde anschließend mit dem Simulations- bzw. dem Reinigungsergebnis verglichen. Dabei konnte für den Fall der Kurbelwelle festgestellt werden, dass sich das Ergebnis des Strömungssimulationsversuchs in weiten Teilen mit dem Ergebnis des realen Reinigungsversuchs deckt. Die Bereiche, die durch die Strömungssimulation als problematisch auszumachen waren, stellten sich auch im realen Versuch als problematisch, nicht reinheitsanforderungsgerecht, dar. Gleiches gilt für den umgekehrten Fall.

Die Optimierung der Vibrationsreinigungsanlage wurde nach dem gleichen Muster durchgeführt: abgeleitet aus den Ergebnissen der Strömungssimulationsversuche wurde die Notwendigkeit gesehen, die obere Hälfte der Absaugvorrichtung in der in Abbildung II.31 dargestellten Weise anzupassen. Die positive Auswirkung dieser konstruktiv optimierenden Änderung konnte durch anschließende Reinigungsversuche in der oben beschriebenen Weise verifiziert werden. An dieser Stelle sei betont, dass die Interpretation und Auswertung aller Ergebnisse der durchgeführten Verifizierungsversuche mit der Versuchsanlage der Firma vibro-tec rein qualitativer Natur waren.

Parallel zu den bei der vibro-tec GmbH laufenden Versuchen wurde am Fachgebiet Maschinenelemente ein eigener Versuchsstand konzipiert und aufgebaut (siehe folgende Abbildungen). Die dazu benötigten finanziellen Mittel wurden aus Finanzmitteln des Fachgebiets aufgewandt. Bei dem Versuchsstand der TU Dortmund wurde die deutlich flexibilisierte Absaugvorrichtung - wie sie bereits in Abschnitt II.1.4 dargestellt wurde (vgl. Abbildung II.31 und Abbildung II.33) - realisiert. Des Weiteren werden die Schwingungen bei dem Versuchsstand mit Hilfe von Unwuchtmotoren erzeugt. Die Entwicklung und die Realisierung eines Versuchsstands an der TU Dortmund ist vor allem damit zu begründen, dass hierdurch die Möglichkeit bestand, alle reinigungsrelevanten Parameter des Verfahrens uneingeschränkt variieren sowie konstruktive Anpassungen ohne räumliche Restriktionen gestalten zu können. Dazu zählte vor allem die alternative Verwendung von Unwuchtmotoren zur Erzeugung der Schwingungen. Änderungen dieser Art wären bei einer Versuchsanlage der vibro-tec nur unter erheblichen Aufwand möglich gewesen.

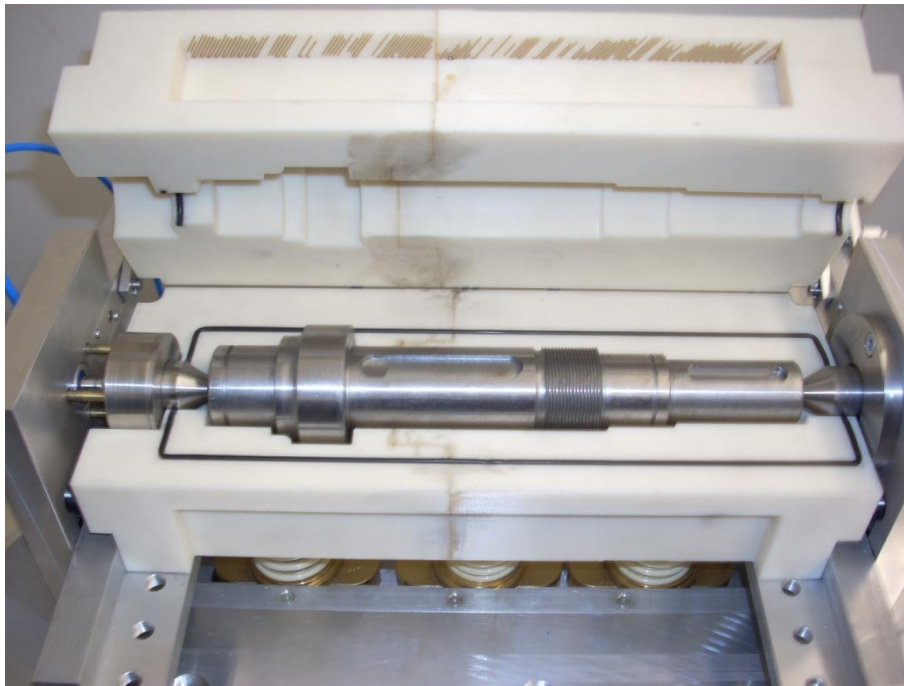


Abbildung II.35: Versuchsstand (Saugwerkzeug mit Versuchswelle)

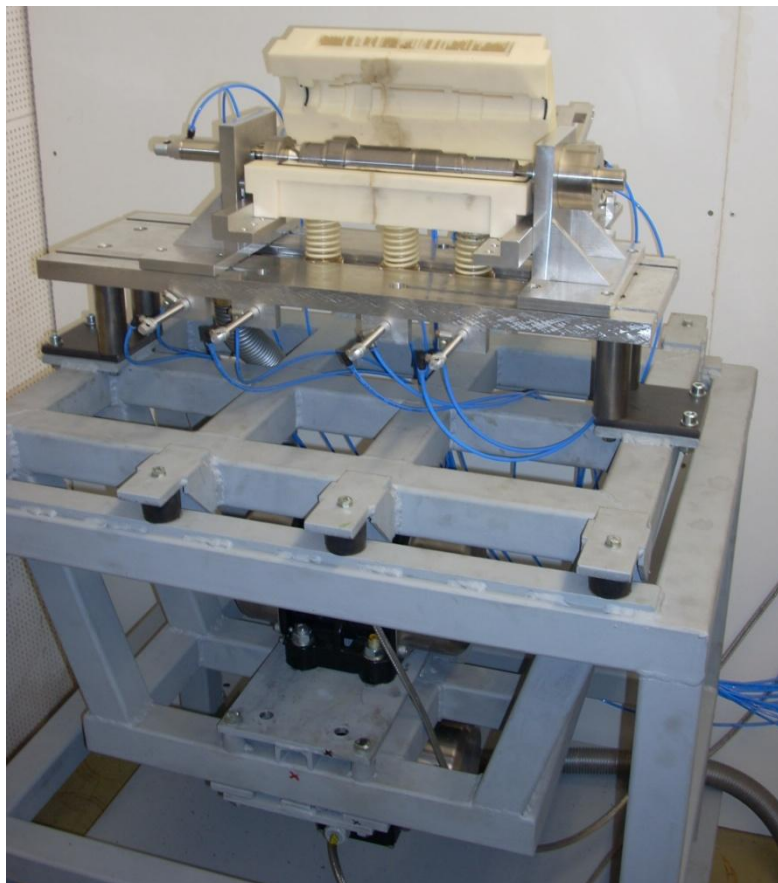


Abbildung II.36: Versuchsstand

Der fachgebietseigene Versuchsstand konnte zum Ende der Projektlaufzeit nahezu vollständig fertiggestellt werden und befindet sich derzeit in der Erprobungsphase. Sobald diese abge-

geschlossen ist, werden aus fachgebietseigenen Mitteln abschließende Reinigungsversuche durchgeführt.

II.1.6 Untersuchung von Schnellrüstkonzepten

Parallel zu der konstruktionssystematischen Untersuchung des Schwingungserzeugers und Spannwerkzeugs sowie der Durchführung von Strömungssimulationen galt es Konzepte zu entwickeln, mit denen eine Nutzung der Vibrationsreinigungsanlage in Fertigungslinien mit Serienfertigungscharakter möglich wird. Der Einsatz von Vibrationsreinigungsanlagen unmittelbar in einer Fertigungslinie anstelle der Nutzung zentral organisierter Großwaschanlagen bietet den Vorteil eines kontinuierlichen Materialflusses im Bereich der Teilereinigung (vgl. Krebs und Deuse 2010). Bauteile können ohne Warte- und Transportzeiten direkt im Anschluss an einen Fertigungsschritt in einem Vibrationsreinigungsprozess einzeln gereinigt werden. Die Integration der Vibrationsreinigung in die Fertigungslinien setzt jedoch voraus, dass mit diesem Reinigungskonzept das gesamte dort gefertigte Teilespektrum gereinigt werden kann. Wie in Abschnitt I.4.1 dargestellt, findet die Reinigung innerhalb bauteilspezifischer Saugbacken statt. Somit impliziert der Gebrauch dieser inliniefähigen Reinigungsanlage, dass für unterschiedliche Produktvariationen einer Produktionslinie ein Umrüsten stattfinden muss, sofern sich die Bauteilgeometrie ändert.

II.1.6.1 Anforderungen an ein Schnellrüstkonzept

Rüsten ist im Allgemeinen ein Prozess innerhalb produzierender Unternehmen, der gewährleistet, dass ein Variantenwechsel in der Produktion stattfinden kann und somit eine Mehrfachnutzung eines Arbeitssystems ermöglicht wird. Da das Rüsten „das Vorbereiten des Arbeitssystems für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe sowie – soweit erforderlich – das Rückversetzen des Arbeitssystems in den ursprünglichen Zustand“ (REFA 1991, S. 21) ist, findet keine Wertschöpfung statt. Das Rüsten kommt einmal je Auftrag vor und umfasst alle Aktivitäten die zur Vorbereitung eines Arbeitssystems für die Erfüllung der anstehenden Arbeitsaufgabe erforderlich sind. Ein Arbeitssystem kann dabei eine einzelne Fertigungseinrichtung, z. B. ein einzelner Arbeitsplatz oder eine einzelne Maschine, aber auch ein komplexes Fertigungssystem umfassen. Die Phasen, in denen die Maschine umgestellt werden muss, sind derzeit häufig mit einem längeren Anhalten der Maschine verbunden. Das Beispiel der Vibrationsreinigungsverfahren zeigt, dass ein Rüstvorgang bis zu einer Stunde dauern kann.

Zur Reduzierung der Rüstzeiten wurden bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt und unterschiedliche Ansätze entwickelt. Diese können in die drei Kategorien

- rüstzeitverkürzend,
- rüstzeitverlagernd und
- rüstzeitvermeidend

unterteilt werden (Wiendahl und Frühwald 1990, S. 667). Bei rüstzeitverkürzenden und rüstzeitverlagernden Konzepten erwies sich eine Einteilung in organisatorische und technische Maßnahmen als sinnvoll, da somit unterschiedliche Handlungsfelder zur Reduzierung der

Stillstandzeiten aufgezeigt werden können (vgl. Frühwald 1990, S.147). Technologische Maßnahmen bedeuten dabei z. B. den Einsatz von Wechsell Plattensystemen oder Schnellspannsystemen. Organisatorische Maßnahmen beinhalten u. a. die vorzeitige Bereitstellung der Rüstmittel, die Organisation der Rüstvorgänge, die Verfügbarkeit des Einrichtepersonals sowie die Arbeitsvorbereitung in Form von Maschinenauswahl, Teilefamilienbildung und Prüfungen (Wischniewski 2010, S.14). Eine organisatorische Alternative ist zudem der Wechsel eines gesamten Anlagenteils, wie zum Beispiel eines Reinigungsmoduls, das während der Hauptzeit eines weiteren Moduls umgerüstet werden kann. Im Rahmen des SMED-Ansatzes (Single Minute Exchange of Die) sollen Rüstprozesse dahin gehend optimiert werden, dass die Anteile des Rüstens, die einen Stillstand der Maschine verursachen (internes Rüsten), möglichst vermieden oder sofern dies nicht möglich ist, minimiert werden. Das externe Rüsten hingegen, also Umrüsttätigkeiten, die während der Prozesszeit der Maschine durchgeführt werden können, sollen ausgeweitet werden (vgl. Shingo 1989, S. 43f. Monden 1998, S. 10; Menzel 2009, S.144ff.). Dadurch können neben den Stillstandzeiten auch Unterbrechungen im Materialfluss auf ein Minimum reduziert werden. Neben dem SMED-Ansatz existieren eine Reihe weiterer etablierter Vorgehensweisen, wie „Analysemethodik produktionstechnischer Rüstabläufe“, „Arbeitswissenschaftliche Bewertung und Gestaltung von Rüstarbeit“, „Sustaining Changeover Improvement“, „Human Factors Aspects in Set-Up Time Reduction“ und „Design for Changeover Methodology“ (vgl. Wischniewski 2010, S. 14ff.). Prinzipiell sind all diese Konzepte auch für die Vibrationsreinigungsanlage und deren Einsatz in der industriellen Fließfertigung von Interesse.

Im Gegensatz zu den rüstzeitverkürzenden und rüstzeitverlagernden Konzepten, bei denen eine Optimierung der Rüstprozesse im Fokus steht, wird bei den rüstzeitvermeidenden Konzepten die Rüstzeit durch die Eliminierung ganzer Rüstvorgänge verkürzt. Hierbei kann in produktionsreihenfolge-, produktgestaltungs- sowie betriebs- und arbeitsmittelinduzierte Konzepte differenziert werden (Wischniewski 2010, S. 20). Für die Entwicklung eines Schnellrüstkonzeptes für die Vibrationsreinigungsanlage ist diese Gruppe der Konzepte nicht relevant, weil der Rüstaufwand unabhängig von einer bestimmten Produktionsreihenfolge sowie der Produktgestalt gleich groß ist, da immer das komplette Saugbackenpaar gewechselt werden muss. Eine Modularisierung der Saugbacken, so dass nur einzelne Module bei Produkten mit geometrischen Abweichungen ausgetauscht werden müssen, erwies sich als nicht zielführend (vgl. Abschnitt II.1.2.1). Simulationsversuche haben ergeben, dass der Saugspalt einen sehr eng tolerierten Grenzwert nicht überschreiten darf um ein akzeptables Reinigungsergebnis zu erhalten. Dies hätte z. B. schon bei einer Gruppe rundsymmetrischer Bauteile mit minimalen Längenunterschieden zur Folge, dass für jeden Durchmesser mehrere Module mit unterschiedlichen Längen vorgehalten werden müsste. Des Weiteren steigt die Anzahl der Module mit wachsender Variantenanzahl weiter sehr stark an.

Mit dem Schnellrüstkonzept für die Vibrationsreinigungsanlage sollte das Ziel erreicht werden, den Rüstvorgang anstelle von bislang sechzig Minuten in weniger als zehn Minuten durchführen zu können. Dabei soll der Rüstvorgang nach Möglichkeit von nur einer Person ohne Zuhilfenahme von Werkezeugen durchgeführt werden. Als größtes Hindernis für die Zielerreichung

galt dabei der bisher zeitintensive Ausbau der Saugbacken sowie der seitlichen Aufnahmen für rundsymmetrische Bauteile.

II.1.6.2 Schnittstellenanalyse

Für die Entwicklung eines Schnellrüstkonzepts ist zunächst im Rahmen einer Schnittstellenanalyse zu prüfen, wo innerhalb bzw. vor und nach der Reinigungsanlage Ansatzmöglichkeiten für ein Umrüsten bestehen.

Die primäre Einsatzmöglichkeit für die Vibrationsreinigungsanlage ist, wie in Abschnitt II.1.1.1 erläutert, die Integration als Zwischenreinigung in die Fertigungslinie. Die möglichen Schnittstellen, die sich aus der Fertigungslinie, dem Aufbau der Vibrationsreinigungsanlage und den Gestaltungsmöglichkeiten des Rüstprozesses ergeben, lassen sich zunächst in drei Kategorien unterteilen. Diese befinden sich zwischen Fertigungsprozess und dem Reinigungsprozess (1), zwischen versorgenden Modulen und dem Reinigungsmodul (vgl. Abschnitt I.4.2) (2) und innerhalb des Reinigungsmoduls (3). Nachfolgend werden diese Schnittstellen genauer auf ihre Eignung zur Realisierung eines Schnellrüstprinzips für Vibrationsreinigungsanlagen untersucht.

Die drei Kategorien lassen sich jeweils weiter differenzieren. Innerhalb der ersten Kategorie unterscheidet man wiederum zwischen zwei relevanten Schnittstellen. Die erste Möglichkeit (1.1) besteht darin, zwei oder mehr Reinigungsanlagen parallel als Folgeschritt einer Fertigung zu betreiben. Dabei wird, je nach Produktvariante, die hierfür geeignete Reinigungsanlage verwendet. Die Zahl der Reinigungsanlagen muss der Zahl der Produktvarianten entsprechen. Durch diese Vorgehensweise wird das Umrüsten einer Anlage umgangen. Über eine Art Weichensystem kann das jeweilige Produkt den richtigen Reinigungspfad durchlaufen. Eine weitere Möglichkeit (1.2) besteht darin, die beiden parallelen Reinigungsanlagen versetzt zu betreiben, sodass eine Reinigungsanlage gerüstet werden kann, während die andere genutzt wird. Dies setzt dabei genügend große Lose voraus, damit ausreichend Zeit zum Umrüsten vorhanden ist.

Die zweite Schnittstellenkategorie befindet sich eine technische Hierarchieebene tiefer, im modularen Aufbau der Vibrationsreinigungsanlage. Hierbei liegt die Schnittstelle zwischen den versorgenden Modulen und dem Reinigungsmodul. Bei dieser Kategorie sieht eine erste Alternative vor, mit einem Versorgungsmodul zwei oder mehrere Reinigungsmodule zu betreiben (2.1), wobei die unterschiedlichen Reinigungsmodule für je eine spezielle Produktvariante vorgesehen sind. Die Reinigungsmodule mit ihren bauteilspezifischen Saugbacken können, je nach zu fertigendem Produkt, in der Linie komplett ausgetauscht und an das Versorgungsmodul angeschlossen werden. Die zweite Alternative beinhaltet, dass zwei oder mehrere Reinigungsmodule fest in der Linie integriert und mit einem Versorgungsmodul verbunden sind, jedoch nur ein Reinigungsmodul in Betrieb ist (2.2). Währenddessen können die Anderen umgerüstet werden.

Die ersten beiden Schnittstellenkategorien erlauben mit ihren Alternativen grundsätzlich, die Rüstzeiten auf ein Minimum zu reduzieren und den Materialfluss aufrecht zu erhalten, wobei

der eigentliche Rüstvorgang im Sinne des Werkzeugwechsels bei Maschinestillstand nicht verbessert oder gar nicht ausgeführt wird. Zudem führt das Vorhalten von ungenutzten Reinigungsmodulen bzw. sogar ganzen Anlagen zu hohen Anlagenkosten. Aufgrund dieser Nachteile wurden diese beiden Kategorien im Sinne der Entwicklung eines Schnellrüstprinzips nicht weiter verfolgt. Die dritte Schnittstellenkategorie sieht schließlich vor, den eigentlichen Rüstvorgang in Form eines Werkzeugwechsels zu verbessern. Bei der Vibrationsreinigungsanlage ist es möglich, von einem Einsatz eines Reinigungswerkzeugs zu sprechen, da der eigentliche Prozess innerhalb der bauteilspezifischen Saugbacken stattfindet, die an die Anlage angeschlossen sind. Somit ist die dritte Schnittstellenkategorie innerhalb des Reinigungsmoduls zu sehen.

Während die Schnittstellenkategorie 2 einen Wechsel des gesamten Reinigungsmoduls vorsieht, bietet dieses Rüstkonzept die Möglichkeit, das gesamte bzw. einen Teil des Innenlebens des Reinigungsmoduls, bis auf einige elektronische Bauteile die am Rahmen befestigt sind, auszuwechseln. Diese können anschließend an einem separaten Arbeitsplatz extern umgerüstet werden (3.1). Zum externen Rüsten gehört im Wesentlichen das Wechseln der Saugbacken. Für den schnellen Wiedereinsatz des Reinigungsmoduls in der Produktion ist die Dauer des internen Rüstens von größerer Bedeutung.

Alternativ kann anstelle eines Entnehmens und Umrüstens des gesamten Reinigungswerkzeuges auch nur ein Wechsel der werkstückaufnehmenden Saugbacken erfolgen (3.2). Dabei werden die Saugbacken gegen die für das nächste Bauteil passenden Saugbacken ausgetauscht und angeschlossen. Der Wechsel der Saugbacken ist die Alternative, bei der am wenigsten Materialvolumen gewechselt wird.

Hierbei besteht allerdings das Problem, dass die Ventile, die jeweils am Rücken der Saugbacken sitzen, nicht für alle Wellen passend positioniert sind. Je nach Werkstück ist es nötig, die Ventile auf dem Trägerstück neu zu positionieren, damit besonders verschmutzte Stellen definiert angeströmt werden können. Dieses Wechseln der Saugbacken mit Versetzen der Ventile wird als dritte Möglichkeit (3.3) aufgenommen, wobei diese Alternative eine Zwischenlösung von der vorherigen Alternative 3.2 und der nachfolgenden Alternative 3.4 darstellt.

Die Weiterentwicklung (3.4) der vorherigen Alternative (3.3) sieht vor, Saugbacken mit integrierten Ventilen zu nutzen. Eine Integration der Ventile in die Saugbacken ermöglicht den Wechsel der Saugbacken, wie in Alternative 3.2 beschrieben. Da die Ventile aber nun an den Saugbacken befestigt sind, müssen diese nicht mehr bei Maschinenstillstand einzeln gelöst, positioniert und befestigt werden, sondern können mit den Saugbacken während eines externen Rüstens vorbereitet werden.

Grundsätzlich bietet Schnittstellenkategorie 1 einen realisierbaren Ansatz. Die volle Automatisierung und Abstimmung für den Fall, dass es sich um große Losgrößen handelt und die Produktvarianten nicht zu oft wechseln, bietet zwar einen kontinuierlichen Materialfluss, verursacht aber hohe Kosten und schränkt die Flexibilität der Produktion ein. Die Schnittstellenkategorie 2 als Zwischenlösung bietet lediglich die Möglichkeit, ein gesamtes Reinigungsmodul auszutauschen, um dieses anschließend extern zu rüsten, damit nur eine kurze Unterbre-

chung des Materialflusses eintritt. Die Schnittstellenkategorie 3, bei der eine Trennung zwischen Maschine und Werkzeug vorgenommen wird, stellt einen besseren Ansatz zur Lösung des Problems des internen Rüstens dar, für den es jedoch geeignete technische Lösungen für ein Schnellrüstkonzept bedarf.

II.1.6.3 Ansätze für ein Schnellrüstkonzept

Die Umsetzung der Schnittstellenkategorie 3 kann auf verschiedene Weisen technisch realisiert werden. Im Rahmen der Entwicklung eines Schnellrüstprinzips sind in erster Linie die technischen Möglichkeiten des Vibrationsreinigungsprozesses zu betrachten.

Die Möglichkeit den Umrüstprozess mit Hilfe von Schnellspannsystemen durchzuführen, welche sich durch Einfachheit auszeichnen, ist im Sinne einer schnellen Durchführung zunächst in Betracht zu ziehen. In kürzester Zeit werden das Werkzeug oder die Saugbacken genau fixiert.

Ein weiterer Aspekt ist die einfache Gestaltung des Umrüstens. Eine Standardisierung der genutzten Bauteile hilft bei der Verkürzung der Arbeitsvorgangsdauer. Verschiedene Werkzeuge, die aber auf derselben Maschine und auch in derselben Werkzeugaufnahme zu integrieren sind, sollten alle auf dieselbe Art und Weise ein- und auszubauen sein. Im Fall der Vibrationsreinigungsanlage wären die Werkzeuge die zu wechselnden Saugbacken. Dieser Aspekt ist bei dem Entwurf eines Schnellrüstkonzeptes von besonderer Bedeutung, da das Umrüsten von Hand mit möglichst wenigen Handgriffen durchgeführt werden soll.

Da zum Rüstvorgang nicht nur der Wechsel von Werkzeugen zählt, sondern auch häufig einhergehend damit die produktvariantenbezogene Software ausgetauscht werden muss, wird der schnelle Austausch von Software neben dem klassischen Werkzeugwechsel mit berücksichtigt. Dies ist für die Vibrationsreinigungsanlage dahingehend relevant, als dass für unterschiedliche Produktvarianten möglicherweise auch unterschiedliche Reinigungsprogramme benötigt werden.

II.1.6.4 Schnellrüstkonzept für die Vibrationsreinigungsanlage

Ein Schnellrüstkonzept für die Vibrationsreinigungsanlage muss die Flexibilität des Reinigungsprozesses durch möglichst schnelles Rüsten ermöglichen. Wie die vorherigen Ergebnisse gezeigt haben, erweisen sich die Schnittstellenalternativen 3.2 und 3.4, also ein Wechseln des Saugbackenpaars um ein schnelles Umrüsten der Vibrationsreinigungsanlage innerhalb der Produktfamilie der Wellen zu realisieren, als zielführende Konzepte. Um ein möglichst einfaches Rüsten zu ermöglichen, mussten mehrere konstruktive Gestaltungsänderungen an der Reinigungsanlage vorgenommen werden.

Die Saugbacken sind gemäß ihrer Lage am Reinigungsmodul in obere und untere Saugbacken eingeteilt. Zwar lässt sich die obere Saugbacke ohne Probleme demontieren und wieder einsetzen; sollte jedoch auch die untere Saugbacke gewechselt werden müssen, besteht das Problem, dass die Aufnahmen für die zu reinigenden Bauteile, die sich an der linken und rech-

ten Seite der Anlage befinden, in den Bereich der unteren Saugbacke hineinragen und den Wechsel der unteren Saugbacke behindern.

Ein Verbesserungsansatz bestand daher, den Sitz der Saugbacken so zu verändern, dass diese um 90° gedreht das Bauteil von der Seite umschließen. So wird der schwierige Ausbau der unteren Saugbacke umgangen. Die seitlichen Aufnahmen können bestehen bleiben, weil sie nicht mehr beim Umrüsten behindernd wirken. Entsprechend der Wellengeometrie und dem Reinigungsbedarf sind auf den Backen Ventile montiert, die wie bisher auch, einzeln Saugkanäle separat öffnen und schließen können.

Bei einem Rüstvorgang werden im Rahmen des externen, nicht zeitbestimmenden Rüstens die für das neue Bauteil benötigten Saugbacken, falls erforderlich mit dem Ventilrahmen, vorbereitet, indem die für diese Bauteile benötigte Anzahl an Ventilen inkl. der Schnellkupplung montiert werden. Das interne, zeitbestimmende Rüsten beinhaltet, die Anlage per Knopfdruck zum Stillstand zu bringen, sobald die letzte Welle das Reinigungsmodul durchlaufen hat. Anschließend müssen die Stecker für die Ventilsteuerung und danach die Schnellspanverschlüsse für die Saugbacken gelöst werden. Im Anschluss sind beide Saugbacken nach oben herauszuheben. Auf genau umgekehrten Weg sind die neuen Saugbacken zu platzieren und zu befestigen. Als letztes muss die seitliche Aufnahme auf die richtige Bauteillänge eingestellt werden. Kleine Abstandsänderungen sollten über die Klemmfunktion zu überbrücken sein. Bei größeren Änderungen ist eine Aufnahme am Klemmhebel zu lösen, auf der Schiene mit Skala entsprechend zu verschieben und wieder zu arretieren. Nach der Softwareumstellung in der Anlagensteuerung ist die Anlage wieder einsatzbereit.

Durch dieses Schnellrüstkonzept ist es möglich, die interne rüstzeitbedingte Unterbrechung der Fertigung sogar unter den Zielwert, in den einstelligen Minutenbereich, zu bekommen.

II.1.7 Handhabungstechnik

Bei der Weiterentwicklung der Vibrationsreinigungstechnologie für den Einsatz in der industriellen Serienfertigung ist die Handhabungstechnik von besonderer Bedeutung, da eine einwandfreie Integrierbarkeit des Vibrationsreinigungsprozesses in bestehende Fertigungskonzepte gewährleistet sein muss. Um ein möglichst optimales Ergebnis zu erreichen, war das Testen und Entwickeln von potentiellen Handhabungs- und Fördersystemen erforderlich. Im Rahmen dieser Bemühungen standen für das Handhabungskonzept die Bauteilbeschickung und die nachfolgende Weiterleitung zur nächsten Bearbeitungsstation im Fokus, die die Kernelemente der Handhabung darstellen. Für diese Herausforderung kann auf eine Vielzahl verschiedener Möglichkeiten zurückgegriffen werden. Die Grundlage für die Planung stellen die Elementarfunktionen und zusammengesetzten Funktionen der Handhabungsaufgabe dar (vgl. Abschnitt II.1.1.3).

Die Wahl bzw. Ausarbeitung eines Handhabungskonzeptes und des damit verbundenen Automatisierungsgrades, der das Verhältnis des Anteils der automatisierten zur Gesamtanzahl aller Funktionen eines Systems beschreibt (DIN 19233), ist immer abhängig von der jeweiligen

speziellen Handhabungsaufgabe und den vorherrschenden Rahmenbedingungen zu treffen. Hierzu müssen i. d. R. vier Aspekte, die sog. Elemente des Handhabungssystems geplant und gestaltet werden (Merz 1994, S. 63). Ein Handhabungssystem besteht demnach aus einem Handhabungsgerät, welches die jeweiligen Bewegungen durchführt. Dieses ist mit einem aufgabenspezifischen Greifer ausgestattet, der die Bauteile aus einer Zubringeinrichtung aufnimmt. Der gesamte Bewegungsablauf wird schließlich von einer Steuerung realisiert.

Die Möglichkeiten für die Umsetzung einer Handhabungsaufgabe reichen von der manuellen Werkstückhandhabung bis hin zur Hochautomatisierung des gesamten Fertigungssystems und hängen im Wesentlichen von der Produktionsmenge, der Variantenvielfalt und der gewünschten Flexibilität ab (vgl. Becker und Eipl 2007). Anhand des Automatisierungsgrades der Bewegungseinrichtungen lassen sich die Handhabungskonzepte formal in vier Klassen einteilen. Prinzipiell lassen sich Handhabungsaufgaben hiernach vollständig automatisiert, teilautomatisiert, mechanisiert und manuell lösen (Haller 1999, S. 12), wobei die einzelnen Klassen zudem unterschiedliche technologische Ausprägungen besitzen können. Einschränkend sei jedoch erwähnt, dass diese Einteilung nur grob getroffen werden kann, da der Automatisierungsgrad in der Praxis nur schwer zu quantifizieren ist (Schnieder 1999, S. 7).

Sehr lang wurde einem Trend zu hochautomatisierten Lösungen nachgegangen. Nach einer Studie des Fraunhofer Instituts für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) reduzieren jedoch immer mehr Anwender ihr Automatisierungsniveau, um flexibler auf Umsatzschwankungen oder Produktumstellungen reagieren zu können (Lay und Schirrmeister 2001, S. 1). Modulare und flexible Systeme werden als eine erforderliche Ergänzung zu den personellen und organisatorischen Zielen angesehen (Hammer 1994).

II.1.7.1 Handhabungskonzepte für verschiedene Planungsräume

Durch die Festlegung der Planungsgrenzen wird definiert, ob sich das Einsatzgebiet des Handhabungssystems zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage tatsächlich nur auf diesen Prozessschritt beschränkt, oder ob es sich auf weitere Prozessschritte innerhalb der gesamten Prozesskette ausdehnt. Auf diese Weise werden die Schnittstellen zur Umwelt, sowie die Ein- und Ausgaben in das Arbeitssystem exakt beschrieben und dem Planungsteam werden somit die zu erfüllenden Aufgaben detailliert vorgegeben (REFA 1991, S. 195 ff.).

Die Betrachtung des Handhabungssystems kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen. Diese Ebenen werden als Planungsräume bezeichnet und im folgenden Abschnitt näher erläutert. Die unterschiedlichen Planungsräume unterscheiden sich vor allem im Umfang der Prozesse die in die Betrachtung einfließen. Je nach Größe des Planungsraumes erhöht sich jedoch auch der Planungsumfang, wobei dieser Mehraufwand durch größere Potentiale bei der ganzheitlichen und prozessorientierten Gestaltung des Arbeitssystems relativiert werden kann. Bereits in der Aufgabenstellung muss der betrachtete Planungsraum festgelegt werden, da dies Auswirkungen auf die Anforderungen und den Planungsumfang des Handhabungssystems hat (vgl. Tabelle II.2).

Planungsraum 1: Beladung der Vibrationsreinigungsanlage

Der erste Planungsraum bei der Entwicklung eines Handhabungssystems zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage beschränkt sich auf den reinen Be- und Entladeprozess. Das zu reinigende Bauteil wird hierbei an einer definierten Stelle, z. B. einer Rutsche, einem Förderband o. ä., die sich in unmittelbarer Nähe der Vibrationsreinigungsanlage befindet, aufgenommen und in die Maschine eingelegt. Im Anschluss an den Reinigungsprozess wird das Bauteil aus der Vibrationsreinigungsanlage entnommen und an einer definierten Ablagestelle abgelegt, von wo es weiter transportiert wird. Die Betrachtung der Stellen an denen das Bauteil von dem vorherigen Prozess oder möglichen Transporteinrichtungen abgelegt wird, wird im Planungsraum 1 nicht berücksichtigt. Stattdessen sollten diese Positionierstellen für die Aufnahmen und die Ablage bekannt sein. Falls dies nicht der Fall ist, wäre es darüber hinaus aber auch möglich sie als gegeben anzusehen, indem für die vielen Parameter, durch die diese Stellen und das sich dort befindende Bauteil charakterisiert werden, sinnvolle Annahmen getroffen werden.

Bei diesem ersten Planungsraum können die Potentiale der verschwendungsarmen Produktion nur zum Teil ausgeschöpft werden, da der Ansatz sich anstelle einer ganzheitlichen Betrachtung auf einen Prozess konzentriert. In der grafischen Darstellung der Handhabungsaufgabe in Abbildung II.37 ist dies deutlich zu erkennen, da an einem willkürlich gewählten Ort in der Prozesskette mit der Handhabung begonnen wird. Prinzipiell ist dieser Planungsraum auch unabhängig von einer konkreten Planungsaufgabe anzunehmen, da die Aufnahme und Ablagestellen frei definierbar sind. Somit wäre es theoretisch auch möglich, zunächst ein Handhabungssystem zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage zu entwickeln und anschließend die Einrichtungen zu planen, mit denen das Bauteil an zuvor festgelegten Stellen positioniert wird.

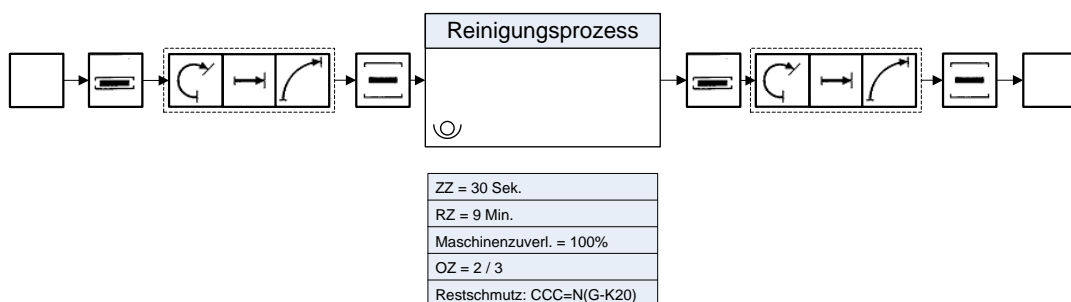


Abbildung II.37 Planungsraum 1 mit beispielhaften Handhabungsfunktionen

Planungsraum 2: Verknüpfung mit dem vor- und nachgelagerten Prozessschritt

Der zweite Planungsraum für die Planung eines Handhabungssystems zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage erstreckt sich von dem vorgelagerten Prozessschritt über den Reinigungsprozess bis zum nachgelagerten Prozess (vgl. Abbildung II.38). Die Berücksichtigung des vor- und nachgelagerten Prozesses ist sinnvoll, da diese durch das Handhabungssystem unmittelbar mit dem Reinigungsprozess verknüpft werden und dabei die speziellen Reinheitsanforderungen berücksichtigt werden können (vgl. Schulz 2006c). Daher beginnt

der Beladeprozess der Vibrationsreinigungsanlage schon mit der Entladung des Betriebsmittels des vorgelagerten Prozesses. Analog dazu endet der Entladeprozess der Vibrationsreinigungsanlage mit der Beladung des Betriebsmittels des folgenden Prozesses. Durch die vor- und nachgelagerten Prozessschritte werden zudem eine Reihe von Anforderungen, wie z. B. der Ordnungszustand des Bauteils bei der Aufnahme oder der Abgabe, festgelegt, die es bei der Umsetzung zu berücksichtigen gilt. Die Beschreibung der Handhabungsaufgabe mit Hilfe der Elementarfunktionen und zusammengesetzten Funktionen des Handhabens beginnt bei diesem Planungsraum somit ausgehend von dem Ordnungszustand des Bauteils in dem vorgelagerten Betriebsmittel des Prozesses und endet schließlich im nachgelagerten Betriebsmittel (vgl. Abbildung II.38).

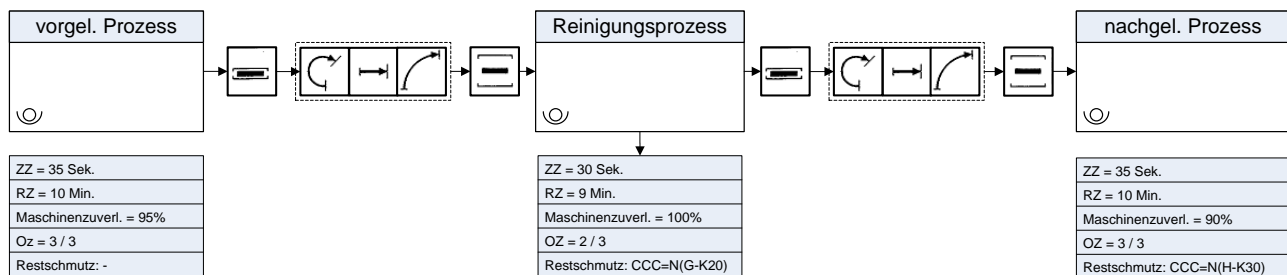


Abbildung II.38 Planungsraum 2 mit beispielhaften Handhabungsfunktionen

Planungsraum 3: Ganzheitliche Planung des Handhabungssystems

Bei dem dritten Planungsraum wird die gesamte Prozesskette mit allen Prozessen und allen erforderlichen Handhabungsaufgaben betrachtet. Diese Betrachtungsweise ermöglicht, dass das Handhabungssystem zusätzlich zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage während deren Prozesszeit, noch weitere Handhabungsaufgaben an anderen Prozessen ausführen könnte. Auf diese Weise kann eine höhere Auslastung des Handhabungssystems erreicht werden. Analog zu der grafischen Abbildung des zweiten Planungsraums (vgl. Abbildung II.38) werden bei der Visualisierung der gesamten Prozesskette alle Prozesse dargestellt und durch die Handhabungssymbole miteinander verknüpft.

II.1.7.2 Anforderungsliste an das Handhabungssystem

Für die Entwicklung einer technischen Lösung zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigung ist es von besonderer Bedeutung, alle Anforderungen an das Handhabungssystem zu kennen, da nur auf diese Weise die Aufgabenstellung umfassend präzisiert und Fehlentwicklungen vermieden werden können. Die Präzisierung der technischen Aufgabe erfolgt dabei in Form einer umfangreichen Anforderungsliste.

Eine mögliche Gliederung in unterschiedliche Anforderungsgruppen kann hinsichtlich der Herkunft der Anforderungen getroffen werden. Zu den Objekten, die Anforderungen an das System stellen, gehören im Falle eines Handhabungssystems zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage die Gruppen Bauteil, Reinigungsprozess, Fertigungsablauf und Sonsti-

ge. Neben der Gliederung nach der Herkunft sollte für jede Anforderung eine Zuordnung hinsichtlich der Notwendigkeit ihrer Erfüllung vorgenommen werden.

Häufig wird an dieser Stelle eine Unterteilung in Forderungen und Wünsche vorgenommen, die für die spätere Bewertung von Lösungsvarianten von Bedeutung ist (VDI 2222). Forderungen (auch als Muss-Kriterien bezeichnet) müssen zwingend von der Lösungsvariante erfüllt werden. Forderungen lassen sich weiter in Festforderungen sowie Mindest- und Höchstforderungen unterteilen. Der Unterschied hierbei besteht darin, dass der zulässige Wertebereich bei den Festforderungen konkret vorgegeben ist (z. B. Bauteilhandhabung mit Industrieroboter). Dagegen sind bei den Mindest- und Höchstforderungen nur Grenzwerte vorgegeben (z. B. Handhabungszeit < 2 Sek.), die es einzuhalten gilt.

Eine geringere Dringlichkeit bei der Erfüllung besitzen die Wünsche (Kann-Kriterium). Die Nichterfüllung eines Wunsches hat somit nicht unmittelbar den Ausschluss der betreffenden Lösungsvariante zur Folge.

Eine auf diese Weise erstellte Anforderungsliste stellt bei der Entwicklung eines Handhabungssystems die wesentliche Informationsgrundlage dar. Während vieler Entwicklungsprozesse entstehen darüber hinaus weitere neue Erkenntnisse, die dazu führen, dass bestehende Anforderungen ergänzt bzw. geändert oder neue Anforderungen hinzugefügt werden müssen. In Tabelle II.2 sind die wesentlichen Anforderungen für die Entwicklung eines Handhabungssystems zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage zusammengefasst, die für den jeweiligen Anwendungsfall spezifiziert werden müssen.

Tabelle II.2: Anforderungsliste an ein Handhabungssystem zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage

Anforderungsliste für Handhabungssystem				
Hauptaufgabe: Be- und Entladen einer Vibrationsreinigungsanlage				
● entspricht dem Regelfall ◐ wird fallbezogen gewählt				
Anforderung	Forderung			Wunsch
	Fest-	Mindest-	Höchst-	
Nennlast der Bewegungseinrichtung	---	●	--	---
Tragkraft des Greifers	---	●	---	---
Geometrie des Bauteils	●	---	---	---
Größe der Kontaktfläche des Greifers	◐	---	●	---
Lage der Kontaktfläche(n)	●	---	---	---
Greifmaße	---	●	---	◐
Flexibilität des Greifers	---	---	---	●
Flexibilität der Bewegungseinrichtung	---	●	---	◐

Umrüstbarkeit der Bewegungseinrichtung	●	---	---	◐
Umrüstbarkeit des Greifers	●	---	---	---
Rüstdauer		---	◐	◐
Anzahl der erf. Freiheitsgrade	●	---	---	---
Positioniergenauigkeit	---	●	---	---
Wiederholgenauigkeit	---	●	---	---
Oberflächenreinheit und -güte	●	---	---	---
Handhabungsdauer zur Beladung	---	---	●	---
Handhabungsdauer zur Entladung	---	---	●	---
Entfernung	---	●	---	---
Zur Verfügung stehende Fläche	◐	---	●	---
Deckenlast	---	---	●	---
Steuerungsschnittstelle	●	---	---	---
Bauteilhandling	---	---	---	●
Manuelle Zugänglichkeit	●	---	---	---
Verfügbarkeit	◐	◐	---	●
Zuverlässigkeit	◐	◐	---	●
Einsatzdauer pro Periode	---	●	---	---
Wartungszyklen	---	---	◐	●
Auslastung des Handhabungssystems	---	◐	---	●
Erkennungs- und Sensorsystem	●	---	---	---
Möglichkeit nach einer weiteren Verwendung des Handhabungssystems	●	---	---	◐
Schnell konkretisieren und umsetzen können	---	---	---	●
Simple Lösung	---	---	---	●
Realisierung ohne Fachwissen möglich	---	---	---	●
Veränderung mit eigenen Mitteln möglich	---	---	---	●
Mitarbeiterqualifikation	---	---	---	●
Arbeitssicherheit und Schutzrichtungen	●			
Umweltfreundlichkeit	---	---	---	●

II.1.7.3 Praxisbeispiel

Anhand eines Praxisbeispiels wird die Integration der Vibrationsreinigungsanlage in eine bestehende Fertigungslinie für Getriebewellen praktisch erläutert. Hierbei wird insbesondere auf die technischen Möglichkeiten für die Handhabung der Bauteile eingegangen.

Die wesentliche Anforderung ist dabei das Bereitstellen und Handhaben der zu reinigenden Teile innerhalb der Taktzeit, die von der vor- oder nachgeschalteten Fertigung vorgegeben wird. Im Idealfall gliedert sich die Reinigungsanlage in den Linientakt ein, ohne den Materialfluss zu verzögern. Sollten die Arbeitsschritte, aufnehmen der Bauteils – ggf. positionieren – einlegen in die Vibrationsreinigungsanlage – reinigen – entnehmen – ablegen zur Weiterverarbeitung, nicht in den Linientakt einzubinden sein, ist zu prüfen, ob zwei Anlagen parallel eingesetzt werden müssen. Sollte die Zykluszeit der Reinigungsanlage jedoch bedeutend kürzer als der Linientakt sein, so kann eine Reinigungsanlage für mehrere zuführende Anlagen arbeiten, sofern diese dieselben Anforderungen an die Reinigung stellen. Jedoch ist bei diesem Ansatz zu beachten, dass der kontinuierliche Materialfluss nicht beeinträchtigt wird.

Im Istzustand des betrachteten Praxisbeispiels werden die Wellen zwischen den einzelnen Bearbeitungsstationen der Linie mit einem Zweiachsportal automatisiert gehandhabt. Am Ende dieser Linie legt das Portal die Wellen auf einem Prismenförderer ab, der eine Pufferfunktion übernimmt. Von dort werden sie von Mitarbeitern mit einem handgeführten Kran (mechanisierte Handhabung) aufgenommen und in Ladungsträgern zum Transport zur dezentral organisierten Nassreinigungsanlage sowie zum anschließenden Weitertransport in die Härterei abgelegt. Die Ladungsträger werden dabei sowohl für den innerbetrieblichen Transport als auch für die Bauteilhandhabung innerhalb des Reinigungsprozesses genutzt. Der Istzustand ist in Abbildung II.39 schematisch dargestellt.

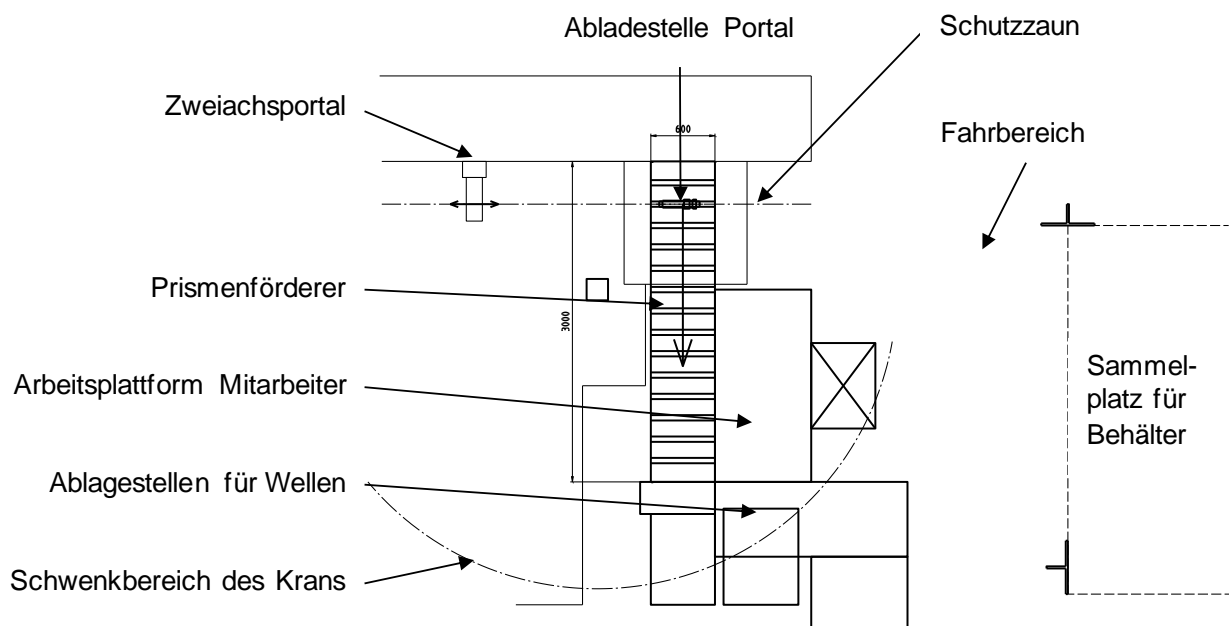


Abbildung II.39: Ursprüngliches Umfeld

Für die Entwicklung eines Sollkonzeptes zur Integration der Vibrationsreinigungsanlage in die Fertigungslinie waren eine Vielzahl an Anforderungen und Rahmenbedingungen zu beachten. So musste sichergestellt werden, dass der manuelle Arbeitsplatz durch den Einsatz der Vibrationsreinigungsanlage nicht vollständig verbaut wurde, damit auch weiterhin die Wellen mechanisiert in die Ladungsträger gelegt werden können, wenn z. B. keine Reinigung erforderlich ist. Zudem war es nicht möglich, den vorhandenen Prismenförderer zu versetzen, was die Einsatzmöglichkeiten der Handhabungstechnik weiter einschränkte. Der sich hieraus ergebende Funktionsplan für die Handhabungsaufgabe ist in Abbildung II.40 dargestellt.

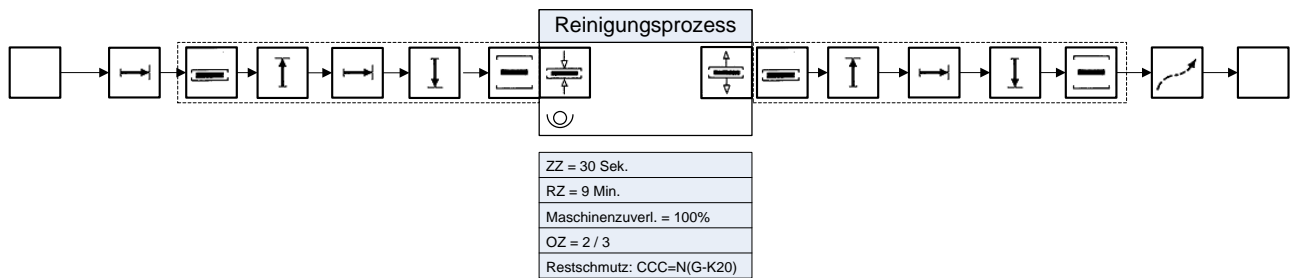


Abbildung II.40: Funktionsplan zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage (ohne zusätzliche Orientierung der Welle)

Auf Grund der Zielsetzung, die Vibrationsreinigungsanlage in eine bestehende Fertigungslinie zu integrieren, war der Planungsraum 1 von Beginn an vorgegeben, da es sich nur um die Planung eines einzelnen Be- und Entladeprozesses handelt. Um eine gute Integrierbarkeit des Lösungskonzeptes zu gewährleisten, wurden die Anforderungen an die Schnittstellen (Prismenförderer) sowie zu den vor- und nachgelagerten Prozessen genau charakterisiert. Das in Abbildung II.41 dargestellte Konzept zur Integration der Vibrationsreinigungsanlage sieht vor, dass aufgrund des geringen Platzangebots nur das Reinigungsmodul in die Linie positioniert wird und die Versorgungsmodule außerhalb platziert werden. Zur Reinigung werden die Wellen von dem bestehenden Zweiachsportal auf dem Prismenförderer abgelegt. An dessen Ende werden die Wellen an einer definierten Position von einem automatisierten Portalsystem aufgenommen und in die, in Längsrichtung des Förderers stehende, Vibrationsreinigungsanlage eingelegt. Eine frühere Aufnahme der Wellen ist nur bedingt möglich, da der vorhandene Schwenkran ebenfalls nicht versetzt werden kann und sichergestellt werden muss, dass dieser nicht mit dem Portal kollidiert. Dies hat zur Folge, dass der Prismenförderer eine Pufferfunktion einnimmt, wodurch die Durchlaufzeiten der Wellen erhöht werden.

Das eingesetzte Handhabungssystem besteht dabei aus einem Zweiachsportal als Handhabungsgerät, welches mit seinen Greifern die Wellen von einem Prismenförderer entnimmt und der Vibrationsreinigung zuführt. Die Steuerung erfolgt voll automatisiert und ist an die Steuerung der gesamten Fertigungslinie angeschlossen. Diese Bestückung der Reinigung erfolgt vollautomatisiert, da die Stückzahlen der Linie dies wirtschaftlich ermöglichen und die weiteren Betriebsmittel ebenfalls automatisiert Be- und Entladen werden. Zudem wird durch die Nutzung zweier Greifer, wobei einer ausschließlich die verschmutzten Wellen handhabt und der andere die sauberen Wellen, eine erneute Rückverschmutzung der Wellen vermieden. Die

Greifer sind an der Z-Achse des neuen 2-Achsen-Portals befestigt, wobei deren Abstand dem Abstandsmaß von Prismenförderer zu Reinigungsanlage und von Reinigungsanlage zu Ablageförderer entsprechen muss. Dann können beide Greifer parallel in Z-Richtung arbeiten und gleichzeitig in X-Richtung verfahren (vgl. Tabelle II.3).

Tabelle II.3: Übersicht der Greiferbewegungen

Greifer 1		Greifer 2
verunreinigte Welle aufnehmen		saubere Welle aufnehmen
	anheben und in X-Richtung in die Ablageposition fahren	
verunreinigte Welle ablegen		saubere Welle ablegen
	leere Greifer anheben und zurückfahren in Position über Prismenförderer und Reinigungsanlage	

Für die Ablage der gereinigten Wellen ist ein weiterer Prismenförderer vorgesehen, auf dem die Wellen zwischengepuffert werden, um anschließend mit Hilfe des Schwenkkrans in die Ladungsträger für die Härterei gelegt zu werden. Ein direktes Ablegen der Wellen in den Ladungsträger ist zwar aus technischer Sicht machbar, würde jedoch einen erheblichen Steuerungsaufwand bedeuten, da die freien Positionen im Ladungsträger variieren und die Ladungsträger ebenfalls automatisiert gehandhabt werden müssen. Durch den Puffer erhöht sich die Durchlaufzeit der Wellen, jedoch wird auf diese Weise der Mitarbeiter von der Linie entkoppelt, wodurch eine parallele Bedienung mehrerer Anlagen möglich wird. Von einer Low Cost Alternative, z. B. in Form einer schiefen Ebene, bei der die gereinigten Wellen gegen einen Anschlag rollen, wurde in diesem Fall abgesehen, da dies zu Oberflächenschäden führen könnte.

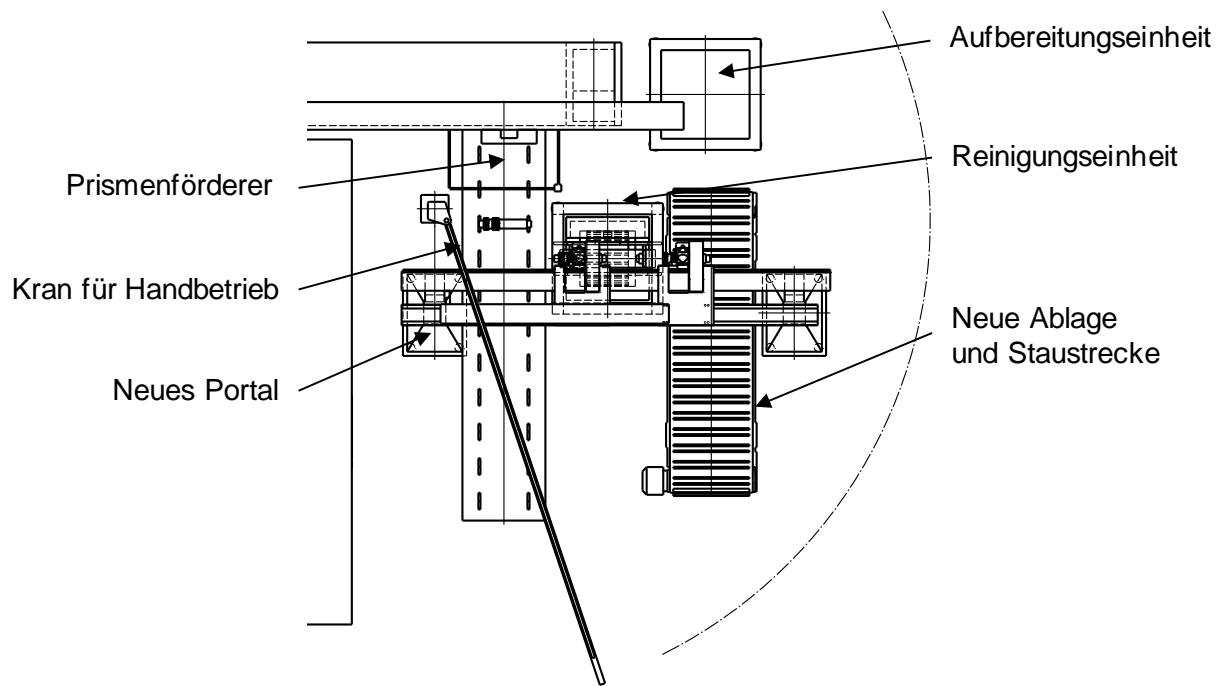


Abbildung II.41: Anlage mit Reinigungsanlage und Ablageförderer

In Abbildung II.42 wird neben der räumlichen Anordnung der einzelnen Handhabungseinrichtungen auch die parallele Anordnung der beiden Greifer an dem Portal dargestellt.

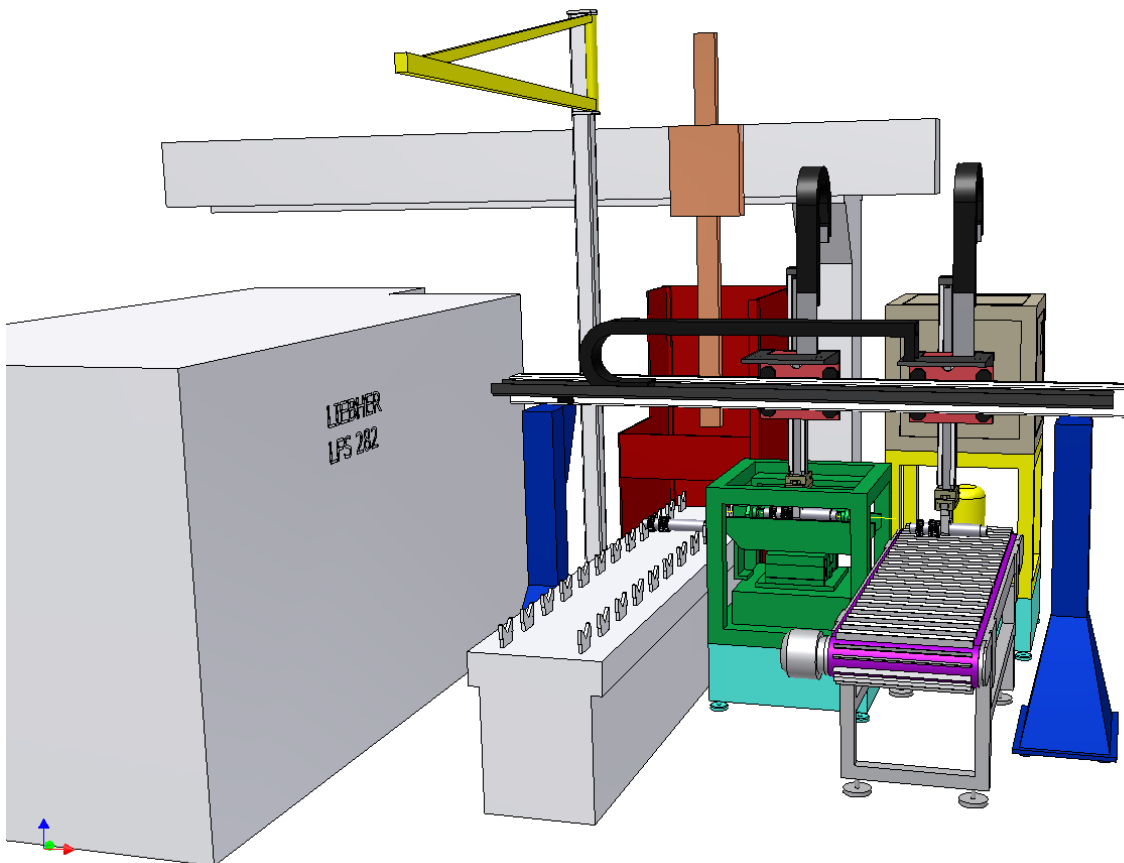


Abbildung II.42: Layout der Wellenzuführung mit Reinigungsanlage und Ablageförderer

Die zuvor dargestellte Handhabungseinheit kann eine Welle der Vibrationsreinigungsanlage nur in der Orientierung zuführen, wie sie auf dem Prismenförderer bereitgestellt wird. Dies ist bei Wellen ohne besondere geometrische Eigenschaften wie Nuten oder Bohrungen, welche spezielle Anforderungen an die Orientierung in der Reinigungsanlage stellen, ausreichend. Bei Produkten die aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften einen definierten Saugstrom benötigen, um z. B. Nuten und Bohrungen zu reinigen, bedarf es einer zusätzlichen Orientierung der Welle vor dem Reinigungsprozess in einer Zwischenstation (vgl. Abbildung II.43 und Abbildung II.44).

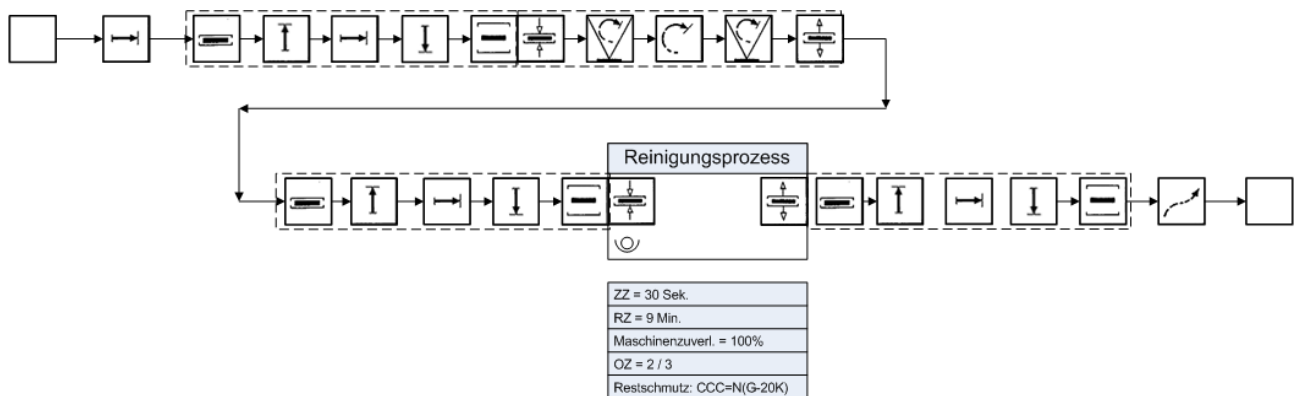


Abbildung II.43: Funktionsplan zur Be- und Entladung der Vibrationsreinigungsanlage (mit zusätzlicher Orientierung der Welle)

In dieser Zwischenstation wird die Welle auf Rollen abgelegt und durch einen Elektromotor langsam um ihre X-Achse gedreht. Ein Laserinitiator, der entlang der Achse der Welle verschiebbar ist, erkennt durch die größere Abtastentfernung die Merkmale. Die Drehbewegung wird nach einem definierten Winkel gestoppt, damit die Nut oder Bohrung sich dann in der gewünschten Position befindet, um in der Saugbacke der Vibrationsreinigungsanlage gezielt angeströmt werden kann. Auch hier ist die Lage der einzelnen Stationen zueinander wichtig. Eine Verschachtelung der Stationen (die Reinigungsstation vorziehen und die Ausrichtstation dahinter positionieren) spart Platz, erfordert aber ein 3-Achs-Portal. Bei der Positionierung in einer Reihe ist die Ausrichtstation zwischen Prismenförderer und Reinigungsanlage einzuplanen.

Anhand dieser zusätzlichen Station wird deutlich, welche Einschränkungen mit dem Planungsraum 1 verbunden sind. Bei einer umfassenderen Planung der Handhabungsaufgabe könnte die Zwischenstation möglicherweise eingespart werden, indem die Welle aus dem vorgelagerten Prozess in einer definierten Orientierung entnommen wird und dieser Ordnungszustand während den Handhabungsoperationen zur Vibrationsreinigungsanlagen beibehalten würde.

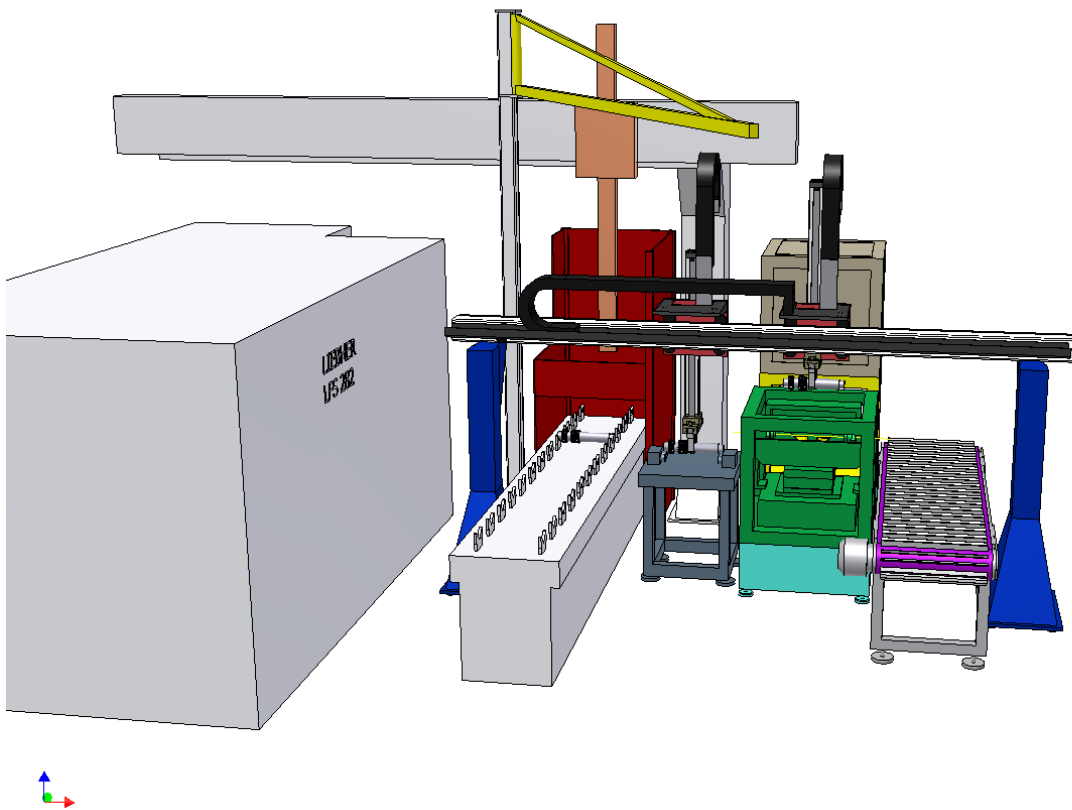


Abbildung II.44: Layout mit zusätzlicher Ausrichtung der Welle

Wie bereits mehrfach erwähnt muss die Zykluszeit für die Reinigung inklusive aller Handhabungsoperationen geringer sein als die Taktzeit der Linie. Eine exemplarische zeitliche Überprüfung bei einem Linientakt von 90 Sekunden ist Tabelle II.4 zu entnehmen.

Tabelle II.4: Ablaufdiagramm

Nr.	Position	Bewegung	Weg [mm]	Endposition	Zeit [s]	Wartezeiten
1	ohne Welle über Förderer ohne Welle über Reinigungsanlage	senken auf Förderer 1 senken in offene Reinigungsbacken	300	am Bauteil am Bauteil	2	(Greifer 1) (Greifer 2)
2	am Bauteil am Bauteil	greifen greifen	15	am Bauteil am Bauteil	2	
3	am Bauteil am Bauteil	heben heben	300	über Förderer 1 über Reinigungsanlage	2	

4	über Förderer 1 über Reinigungs- anlage	quer	600	über Reinigungs- anlage über Förderer 2	2	
5	über Reinigungs- anlage über Förderer 2	senken	300	in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2	2	
6	in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2			in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2	1	übergeben
7	in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2	öffnen	15	in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2	1	
8	in der Reinigungs- anlage auf Förderer 2	Heben	2	über Reinigungs- anlage über Förderer 2	2	
9					60	reinigen
10	über Reinigungs- anlage über Förderer 2	Quer zurück	600	über Förderer 1 über Reinigungs- anlage	2	Wartezeit auf Reinigungsende
11	über Förderer 1 über Reinigungs- anlage	senken auf Förderer 1 senken in offene Rei- nigungsbacken	2	am Bauteil am Bauteil	2	
					Taktzeit	78

Die Investitionskosten, die für die skizzierte Handhabungslösung anfallen, belaufen sich für das 2-Achsportal auf ca. 48.000 €. Für den Fall, dass das vorhandene Platzangebot nicht ausreichend ist, kann auch ein 3-Achsportal eingesetzt werden, was Investitionskosten in Höhe von 72.000 € verursacht. Für die Ausrichtstation zum Ausrichten der Wellen, bestehend aus einem Tisch mit Aluminiumprofilrahmen, einem Antrieb für zwei Scheibensätze auf die die Welle aufgelegt wird, einem Lasersensor und der Steuerung fallen ca. 1.500 € an. Der Gurtbandförderer mit einer Nennbreite von 600 mm und einer Länge von ca. 2.000 mm auf einem Gestell ohne Räder und nicht Höhenverstellbar kostet ca. 4.000 €. Da bei der skizzierten Handhabungslösung mit einer automatischen Ablage auf dem Förderer gearbeitet werden soll, ist es unumgänglich den Bereich von der vorderen bis zu hinteren Förderstrecke einzuzäunen. Die Kosten für den Schutzzaun hängen sehr stark von den Gegebenheiten vor Ort ab. Auch

gilt es zu berücksichtigen, wie viele zusätzliche Eingriffsmöglichkeiten erforderlich sind. Ein Schutzzaun inkl. Türen (mit elektronischer Verriegelung) kostet ca. 700 €/m. Somit belaufen sich die gesamten Investitionskosten im Falle dieses Beispiels auf ca. 56.000 €.

II.1.8 Restschmutzanalysen

Zur Quantifizierung des Reinigungsergebnisses, das mit der Vibrationsreinigungsanlage erreicht werden kann, wurden zum Ende des Forschungsvorhabens Restschmutzanalysen mit verschiedenen Testbauteilen der Fa. vibro-tec durchgeführt, die zuvor in Versuchs- und Kundenanlagen gereinigt wurden.

Das Vorgehen zur Sauberkeitsuntersuchung bei partikulären Verunreinigungen richtet sich dabei nach der Richtlinie VDA 19, die durch den Verband der Automobilindustrie festgelegt wurde und mittlerweile branchenübergreifend angewandt wird. Das standardisierte Verfahren zur Sauberkeitsprüfung lässt sich in drei grundlegende Schritte unterteilen, welche die Extraktionsprozedur, das Analyseverfahren und die abschließende Dokumentation umfassen (vgl. Abbildung II.45). Durch das Extraktionsverfahren sollen zunächst die Partikel vom Prüfobjekt gewonnen werden, z. B. durch Ablösen mit Flüssigkeit, durch Schütteln oder das Ultraschallverfahren. Die anschließende messtechnische Analyse der Partikel erfolgt mit Hilfe von Gravimetrie und Lichtmikroskopie. Die Analyse mit Hilfe der Lichtmikroskopie sowie einer angeschlossenen Software-technischen Auszählung des Analysefilters verschafft einen Aufschluss über die Beschaffenheit der Partikel und deren Größenverteilung. In einem dritten Schritt werden die Ergebnisse der Analyse ausgewertet und dokumentiert.

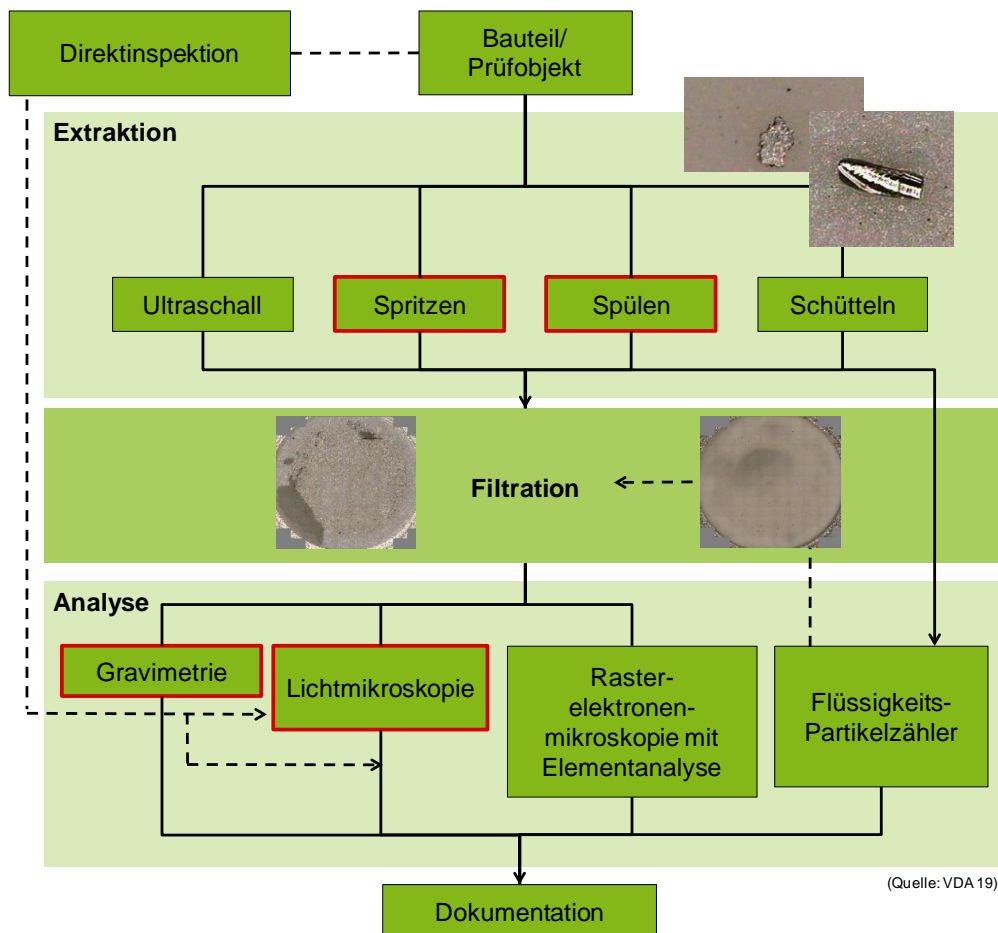


Abbildung II.45: Ablaufdiagramm Restschmutzanalyse (VDA 19)

Neben diesen drei grundlegenden Schritten sind i. d. R. weitere Aufgaben durchzuführen, um ein unverfälschtes Reinigungsanalyseergebnis sicherzustellen. So sollte vor der Extraktionsprozedur eine Blindwertbestimmung durchgeführt werden, um zu bestimmen, in wie weit zusätzlich durch die Prüfung eingebrachte Verunreinigungen das Prüfergebnis verfälschen. Zudem soll im Vorfeld der Prüfung getestet werden, ob die gewählte Extraktionsmethode für das vorliegende Bauteil geeignet ist, um dieses vollständig abzureinigen und somit einen ausreichenden Aufschluss über den Verschmutzungsgrad gibt. Um dies sicherzustellen, werden vor der Restschmutzanalyse Abklingsmessungen vorgenommen. Das bedeutet, dass durch mehrmaliges Durchführen der Extraktion die Verschmutzung des Bauteils kontinuierlich abnimmt. Aufgrund der beschriebenen Teilschritte, die neben der eigentlichen Restschmutzanalyse durchgeführt werden, gestaltet sich das Verfahren als sehr genau, jedoch auch als zeitaufwändig. Zurzeit sind aber keine alternativen Verfahren am Markt bekannt, sodass sich zur Untersuchung der Sauberkeit von gereinigten Bauteilen hinsichtlich partikulärer Verunreinigungen nur dieses Restschmutzanalysekonzept anwenden lässt.

Bei der Untersuchung unterschiedlicher Bauteile, die zuvor mit Vibrationsreinigungsanlagen gereinigt wurden, wurde festgestellt, dass mit dem reinen Vibrationstrockenreinigungsverfahren nicht alle partikelförmigen Verunreinigungen auf Bauteilen entfernt werden können. Durch den verbleibenden Restölfilm werden Partikel kleiner 500µm nicht prozesssicher von

der Bauteiloberfläche entfernt. Sofern die Restschmutzvorgaben höher sind, kann das Vibrationstrockenreinigungsverfahren jedoch um einen Nassreinigungsschritt erweitert werden. Im Falle einer weiteren Anlage der Fa. vibro-tec wurde dies umgesetzt, wobei einschränkend zu erwähnen ist, dass es sich hierbei um eine Anlage der Baureihe VT-R mit einem Rundkopf handelte. Durch diese Kombination kann die maximale Größe der verbleibenden Partikel auf eine Größe kleiner 200µm verringert werden, was heute in vielen Anwendungsfällen dem Stand der Technik entspricht. Somit bestätigen die erzielten Ergebnisse, dass mit einer kombinierten Vibrationsreinigungsanlage die aktuellen Reinheitsanforderungen erfüllt werden können. Jedoch beschränkte sich das Forschungsvorhaben ViReBa auf das Vibrationstrockenreinigungsverfahren, dessen Einsatzgebiet die identifizierten Grenzen aufweist. Für eine detaillierte Untersuchung der Wirkzusammenhänge und der zu erzielenden Sauberkeit bedarf es einer Reihe weiterer umfangreicher Untersuchungen, die zukünftig angestrebt werden sollte. In Anhang B ist das exemplarische Ergebnis einer Restschmutzanalyse dargestellt.

II.1.9 Zusammenfassung

In den vorherigen Abschnitten wurden die wesentlichen Projektergebnisse vorgestellt, die eine weitere Verbreitung der Vibrationsreinigung in der industriellen Serienfertigung ermöglichen sollen. Zunächst wurden hierzu die wesentlichen Charakteristika eines Reinigungsszenarios identifiziert, anhand derer die Eignung der Vibrationsreinigung für einen Anwendungsfall analysiert werden kann. Für die detaillierte Planung der Vibrationsreinigung, insbesondere unter Berücksichtigung des gesamten Wertstroms, wurde ein Datenbogen entwickelt, mit dem die umfangreichen Rahmenbedingungen für einen Anwendungsfall aufgenommen werden können. Um die ökonomischen Vorteile, die mit dem Einsatz der Vibrationsreinigung gegenüber einem Nassreinigungsverfahren erzielt werden können, überschlägig zu quantifizieren, wurde des Weiteren ein Wertschöpfungsrechner entwickelt.

Im konstruktiven Bereich wurde eine deutliche Flexibilisierung der Absaugvorrichtung und der Spannvorrichtung der Vibrationsreinigungsanlage erreicht. Hierdurch konnte einerseits die potenziell erreichbare Reinigungsqualität des Verfahrens gesteigert und andererseits das Produktspektrum reinigbarer Bauteile erweitert werden.

Im Bereich der Strömungssimulation wurde eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht, strömungs- und damit reinigungsoptimierte Saugwerkzeuge selbst für komplizierte Bauteile zu konstruieren und mit Hilfe eines 3D-Printing-Verfahrens zu produzieren. Die Methode ermöglicht es außerdem, die potenzielle Reinigbarkeit von Bauteilen mit der Vibrationsreinigung bereits vor der Herstellung von Reinigungswerkzeugen zu prognostizieren.

Anschließend wurden für die technische Integration der Vibrationsreinigungsanlage in Fertigungslinien mögliche Handhabungskonzepte entwickelt. Im Projektverlauf wurde jedoch deutlich, dass diese Konzepte für die verschiedenen Anwendungsfälle individuell gestaltet werden müssen, wobei auf Grundbewegungsabläufe zurückgegriffen werden kann.

Zur Quantifizierung der Reinigungsleistung des Vibrationsreinigungsverfahrens wurden abschließend Restschmutzanalysen durchgeführt, welche die Grenzen des Vibrationstrockenreinigungsverfahrens aufzeigten, aber auch die möglichen Reinheitsergebnisse, die mit einem kombinierten Verfahren möglich sind, in Aussicht stellten.

Durch die entwickelten Lösungsbausteine ist die Basis geschaffen worden, neue Marktsegmente für das Vibrationsreinigungsverfahren zu erschließen und somit eine weitere Verbreitung in der Serienfertigung zu erzielen.

II.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In Tabelle II.5 sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aller Projektpartner zusammen gefasst.

Tabelle II.5: Zuwendungsfähige Personalkosten und mit der Pauschale abgegoltene Kosten

Firma	Kosten / Ausgaben im Jahr 2008 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2009 [€]	Kosten / Ausgaben im Jahr 2010 [€]	Gesamtkosten/ausgaben [€]	Förderquote	
vibro-tec	19.594,00	96.177,37	98.705,63	214.477,00	34,9 %	74.777,10
Neuhäuser	12.978,95	22.879,07	8.962,12	44.820,14	27,5 %	12.325,54
APS	11.801,07	38.231,65	29.308,85	79.341,57	100 %	79.341,57
ME	0,00	55.300,67	28.093,74	83.394,41	100 %	83.394,41

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Obwohl das Vibrationsreinigungsverfahren bereits zu Projektbeginn erhebliche ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber den etablierten Nassreinigungsverfahren bot, besaß es dennoch Schwächen im Bezug auf die industrielle Robustheit sowie Umsetzungsqualität, die vor Projektbeginn einen flächendeckenden Einsatz erschwerte. Die hierfür erforderliche Weiterentwicklung war aufgrund der Komplexität und der damit verbundenen Kosten für ein kleines Unternehmen wie die vibro-tec GmbH nicht möglich. Aus diesem Grund wurde ein Forschungskonsortium gebildet, welches wie in Abschnitt II beschrieben, unterschiedliche Handlungsfelder zur Weiterentwicklung des Vibrationsreinigungsverfahrens bearbeitete. Das erste Handlungsfeld, die Planung und Gestaltung eines verschwendungsarmen Wertstroms, das in den Reinigungsprozess integriert werden soll, stellt für einen Anlagenbauer mit nur geringen Erfahrungen bei der Gestaltung produktionsorganisatorischer Zusammenhänge eine große Herausforderung dar. Zudem erschwert der geringe Umfang an Literatur zum Thema Bauteilreinigung und Bauteilsauberkeit die Planung und Gestaltung solcher Wertströme, sodass die wissenschaftliche Begleitung durch den Lehrstuhl für Arbeits- und Produktionssysteme ein wesentlicher Erfolgsfaktor bei der Entwicklung von Werkzeugen zur Identifikation typischer Reinigungsszenarien sowie zu deren Aufnahme war.

Die vormals auf dem Try-and-Error-Prinzip basierende Auslegung und Gestaltung der Saugbacken kann nach Abschluss des Forschungsvorhabens systematisch und effizient durchgeführt werden. So ist es jetzt möglich, die Reinigbarkeit neuer Bauteile bereits im Voraus, ohne den zeit- und kostenaufwendigen Bau von Prototypen, zu beurteilen. Des Weiteren ist es ohne den zeit- und kostenaufwendigen Bau von Prototypen möglich, strömungsoptimierte und damit reinheitsanforderungsgerechte Saugwerkzeuge sowohl für einfache als auch für komplizierte Bauteile mit Hilfe eines 3D-Printing-Verfahrens schnell und unkompliziert zu produzieren. Gerade die Saugformgenerierung hatte sich als großes Hindernis bei der Verbreitung der Vibrationsreinigung gezeigt. Die Saugformen wurden ursprünglich in Handarbeit abgegossen. Dies machte arbeits- und zeitintensive Vorarbeiten am zu reinigenden Bauteil, wie das Auftragen einer ca. 2 bis 3 Millimeter dicken Beschichtung, nötig, um den Luftspalt im Saugwerkzeug zu generieren. In einer aufwendigen Nacharbeit wurden dann die Spalte und Kanäle, die die Luft an die zu reinigenden Stellen heranführen, spangebend eingebracht. Die möglichen Geometrien waren dabei durch die Fertigungsverfahren begrenzt, was eine strömungstechnische Optimierung fast unmöglich machte. Zudem existierte keinerlei Werkzeug, welches es ermöglichte, Reinigungsergebnisse zu prognostizieren. Vor diesem Hintergrund musste ein iterativer Prozess angestoßen werden, bei welchem die Formen nach und nach in Handarbeit immer weiter verbessert werden mussten. Häufig war hierfür die Generierung zahlreicher neuer Saugformen notwendig. Nach der endgültigen Generierung lagen die Daten der Form inklusive der Kanäle nicht vollständig digitalisiert vor, so dass weitere Saugformen nochmals in Handarbeit zu generieren waren, während nach dem 3D-Printing-Verfahren beliebig viele Formen in gleichbleibender Qualität hergestellt werden können, was den Nutzen der geleisteten Arbeit deutlich macht.

Diese Ergebnisse konnten nur aufgrund der fundierten Fachkenntnisse und der teilweise mehrjährigen Erfahrungen des Personals des Fachgebiets Maschinenelemente in den Bereichen der 3D-Konstruktion und der Strömungssimulation erzielt werden. Ein zeit- und damit kostenintensives Einarbeiten von Mitarbeitern der vibro-tec GmbH in diese Bereiche wäre wegen der im laufenden Wirtschaftsbetrieb nicht vorhandenen bzw. nur geringen Personalkapazitäten nicht oder nur bedingt möglich gewesen. Zudem sind die 3D-Konstruktionssoftware Autodesk INVENTOR und besonders die Strömungssimulationssoftware ANSYS CFX im industriell-kommerziellen Einsatz extrem hochpreisig. Die Anschaffung vor allem der Strömungssimulationssoftware ANSYS CFX wäre dem derzeit noch relativ kleinen mittelständischen Betrieb vibro-tec GmbH daher nur schwer möglich gewesen.

Ebenfalls konnten nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit innovative Schnellrüstkonzepte entwickelt und konstruktiv umgesetzt werden. Zur Integration eines Reinigungsprozesses in Fertigungslinien bedarf es zudem angepasster Handhabungslösungen um den Materialfluss zu realisieren. Da die Möglichkeiten zur Be- und Entladung einer Reinigungsanlage sehr vielfältig sein können und immer in Abhängigkeit von dem vorhandenen Reinigungsszenario entwickelt werden müssen, bedurfte es der Zusammenarbeit mit der Fa. Neuhäuser, welche hierfür die erforderliche Kompetenz besitzt.

Die Quantifizierung der Reinigungsergebnisse war zu Beginn des Projektes nicht vorgesehen. Während der Projektlaufzeit wurde jedoch deutlich, dass für eine zuverlässige Bestimmung der Sauberkeit die Durchführung von genormten Restschmutzanalysen unumgänglich waren. Die hierfür erforderliche Ausstattung und die Kompetenzen bei der Versuchsdurchführung wurden von den Lehrstühlen der TU Dortmund aus Eigenmitteln beschafft und für das Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Ziel des Projektes ViReBa war die Weiterentwicklung des Vibrationsreinigungsverfahrens für den Einsatz in der Serienfertigung. Hierzu sollten Konzepte entwickelt werden, wie das Verfahren bzgl. des Produktspektrums, der Qualität und des Rüstaufwandes optimiert sowie in bestehende Fertigungslinien integriert werden kann. Diese Konzepte sind die Grundlage für eine weite Verbreitung dieses Verfahrens und somit die Basis für eine Fertigung der Vibrationsreinigungsanlagen in höheren Stückzahlen. Das Interesse der produzierenden Industrie, insbesondere im Bereich der Automobilindustrie, ist nach wie vor sehr groß. Durch die Zurückhaltung der Industrie im Jahr 2009 bei der Investition in neue Anlagen konnten die angestrebten größeren Absatzzahlen noch nicht vollständig erlangt werden. Es ist dennoch davon auszugehen, dass diese mittelfristig erreicht werden können, da sowohl das Interesse an der Vibrationsreinigung als auch die konkreten Anfragen bei der Fa. vibro-tec GmbH im Jahr 2010 stark zugenommen haben. Die im Forschungsprojekt erzielten Ergebnisse werden in hohem Maße bei der Konstruktion der neuen Anlagen berücksichtigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die dargestellten Ergebnisse in ihrer Gesamtheit langfristig zu einer Ausweitung des Einsatzbereiches des Verfahrens in der Industrie führen. Das heißt, durch die Ausweitung des Spektrums reinigbarer Bauteile sind potentiell zusätzliche Vibrationsreinigungsanlagen absetzbar. Zudem erlauben die Forschungsergebnisse jetzt schon bei einer Anfrage, die Eignung der Vibrationsreinigungsanlage für ein Reinigungsszenario systematisch zu analysieren und eine Abschätzung des zu erzielenden ökologischen und ökonomischen Nutzens zu erlangen (vgl. Abschnitt II.1.1).

Im Rahmen der konstruktionssystematischen Untersuchungen wurde die Absaugvorrichtung der Vibrationsreinigungsanlage sowohl im unteren als auch im oberen Bereich des Saugwerkzeugs flexibilisiert. Hierdurch ist es möglich, eine der spezifischen Bauteilgeometrie entsprechende, optimale Absaugströmung an das Bauteil anzulegen und damit die Reinigungsqualität zu verbessern.

Die Spannvorrichtung wurde dahingehend optimiert, dass ein deutlich erweiterter Bereich unterschiedlich großer, wellenförmiger Bauteile gespannt und somit gereinigt werden kann. Zudem wurde durch die Neukonstruktion des Spannsystems die Art der Vibrationsübertragung auf das zu reinigende Bauteil so verändert, dass nun das Saugwerkzeug zusammen mit dem Bauteil in Schwingung versetzt wird. Hierdurch wurde es ermöglicht, dass der Luftspalt zwischen der Saugwerkzeuginnenkontur und dem Bauteil kleiner gestaltet werden kann. Wie bereits in Abschnitt II.1.2.1 erläutert wurde, führt eine Verkleinerung des Luftspalts zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit im Saugwerkzeug und damit zu einer potenziellen Verbesserung der Reinigungswirkung des Verfahrens.

Durch die Zuhilfenahme der Strömungssimulation ist es nun möglich, die Reinigbarkeit von Bauteilen bereits im Voraus, ohne den Bau von Saugwerkzeugprototypen, abzuschätzen. Des Weiteren ermöglicht es der Einsatz der Strömungssimulation, strömungs- und damit reini-

gungsoptimierte Saugwerkzeuge selbst für komplizierte, wellenförmige Bauteile, wie beispielsweise PKW-Kurbelwellen, zu produzieren.

Mit Hilfe der entwickelten Schnellrüstkonzepte können Vibrationsreinigungsanlagen auch in Wertströmen mit einer höheren Variantenanzahl wirtschaftlich eingesetzt werden, da die rüstzeitbedingten Maschinenstillstände erheblich reduziert werden konnten.

Handhabungslösungen zur Be- und Entladung einer Vibrationsreinigungsanlage müssen immer individuell für den jeweiligen Anwendungsfall gefertigt werden. Die Projektpartner können bei zukünftigen Projekten auf die erzielten Ergebnisse zurückgreifen. Insbesondere sei hierbei die erweiterte Wertstrommethodik zu erwähnen (vgl. Abschnitt II.1.1.3), mit Hilfe derer die Handhabungsaufgabe visuell dargestellt werden kann und somit als standardisierte Diskussionsgrundlage über Abteilungs- und Unternehmensgrenzen hinweg dienen kann. Zudem sind während der Projektierung für das Praxisbeispiel kritische Punkte aufgetreten, die bei ähnlichen Projekten insbesondere bei der Fa. Neuhäuser frühzeitig mit in Betracht gezogen werden können. So sind z. B. Greiferformen und erforderliche Bewegungsabläufe zur Beladung der Vibrationsreinigungsanlage in vielen Fällen ähnlich und können somit für neue Projekte übernommen werden.

Neben den direkten Ergebnissen zur Weiterentwicklung des Vibrationsreinigungsverfahrens konnten im Rahmen des Projektes viele weiterführende Erkenntnisse im Themenfeld der technischen Sauberkeit erlangt sowie erhebliche Defizite im Bereich des Stands der Technik aufgedeckt werden. Diese waren insbesondere für die beteiligten Lehrstühle der Technischen Universität Dortmund der Auslöser, das Arbeitsgebiet weiter vertiefen zu wollen und neue Projekte im Bereich der Bauteilreinigung und technischen Sauberkeit zu akquirieren. Hierzu wurde schon während der Projektlaufzeit aus Eigenmitteln ein RestschmutzanalySELabor eingerichtet. Mit Hilfe des Labors ist es den Lehrstühlen möglich, quantitative Aussagen über die partikuläre Verunreinigung von Bauteilen nach Reinigungsprozessen zu machen.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Bereich der industriellen Bauteilreinigung und insbesondere im Technologiefeld Vibrationsreinigung sind keine neuen Erkenntnisse, die für den weiteren Projektverlauf von Relevanz sind, bekannt geworden. Dies ist vor allem dadurch zu erklären, dass auf dem Gebiet der Bauteilreinigung allgemein immer noch sehr wenig Forschungsaktivitäten stattfinden und die Vibrationsreinigung zudem ein sehr innovatives und noch wenig verbreitetes Verfahren ist.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Deuse, J.; Krebs, M.; Droste, M.; Döhler, K.: Bauteilreinigung im Wertstrom. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 9, S. 598-601.

Döhler, K.: Ökologischer und wirtschaftlicher Nutzen der Vibrationsreinigung von industriell hergestellten Bauteilen. Vortrag im Rahmen des Fachforums auf der Messe Parts2clean, Stuttgart, 28.-30.10.2008.

Deuse, J.; Döhler, K.: Projektvorstellung auf der Informationsveranstaltung „Der Innovationsstandort“, Kamen, 26.03.2009.

Krebs, M.: Posterpräsentation beim Workshop „Verschwendungsarme, variantenreiche Serienfertigung“, Dortmund, 28.04.2009.

Krebs, M.; Richard, T.; Döhler, K.: Weiterentwicklung der Vibrationsreinigung - Flexibel und sicher für Inline-Prozesse. In: JOT - Journal für Oberflächentechnik (2009) 5, S. 56-57.

Krebs, M.; Schmitz, L.; Deuse, J.: Sustainable cleaning of parts. In: Proceedings of XIV Summer School “Francesco Turco”, 15.-19.09.2009, Monopoli, Italy, S. IV.138 IV.144.

Krebs, M.; Deuse, J.: Parts cleaning in the value stream. In: Proceedings of 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009), 05.-07.10.2009, München, S. 800-809.

Plate, F.: Komplexe Geometrien dank Vibrationsreinigung hochwertig beschichten. Vortrag im Rahmen des Fachforums auf der Messe Parts2clean, Stuttgart, 20.-22.10.2009.

Krebs, M.; Deuse, J.: Resource efficient and economic parts cleaning - Requirements oriented cleaning saves resources, energy and money. In: International conference on competitive manufacturing (Coma '10), 03.-05.02.2010, Stellenbosch (South Africa), S. 165-170.

Döhler, K.: Inline-Reinigung von Werkstücken. Sauberer mit Nass-Trocken-Vibration. In: JOT - Journal für Oberflächentechnik (2010) 4, S. 102-103.

Oeken, N.; Richard, T.: Ressourcen- und Kosteneinsparung durch die Optimierung der Konstruktion und den Einsatz anforderungsgerechter Reinigungsverfahren. Vortrag im Rahmen der 1. Fachtagung „Technische Sauberkeit in Montage- und Produktionsprozessen“ der miC, Waldenburg/Hohenlohe, 08. Juni 2010.

Krebs, M.: Posterpräsentation bei der Fachtagung „Industrial Engineering: Prospektiv planen und kontinuierlich verbessern“, Dortmund, 10.06.2010.

Literaturverzeichnis

Aurich 2006

Aurich, J. C.: *Ergebnisbericht der Untersuchung zur Beherrschung der Sauberkeit von zerspanend hergestellten Bauteilen*. Kaiserslautern, 2006.

Baumgärtner 2001

Baumgärtner, U.: *Feinreinigung verschiedener Metalle. Praktische Beispiele für wässrige Reinigungsprozesse*. In: *Metalloberfläche* 55 (2001), Nr. 3, S. 22-23.

Becker 2005

Becker, Thorsten: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. Berlin u. a.: Springer, 2005.

Becker und Eipl 2007

Becker, P.; Eipl, W.: *Montageinseln nach dem Toyota-Prinzip gestalten. Wichtige Bausteine im Heidelberger Produktionssystem*. In: *ZWF* 102 (2007), Nr.11, S. 775-777.

Daiber 2010

Daiber, Thomas: *Schritt für Schritt weniger Energie*. In: *JOT* (2010), Nr.4, S. 92-95.

Deuse und Döhrer und Droste 2008

Deuse, J.; Döhrer, K.; Droste, M.: *Environmental and Economic Benefits of Vibration Cleaning*. In: *Conference Proceedings of the 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. 17.-19. März 2008, Sydney, Australien, S. 634-639.

Deuse und Stausberg und Wischniewski 2007

Deuse, J.; Stausberg, J. R.; Wischniewski, S.: *Leitsätze zur Gestaltung einer verschwendungsarmen Produktion*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 102 (2007) Nr. 5, S. 291-293.

DIN 19233

Deutsche Norm DIN 19233: *Prozessautomatisierung. Automatisierung mit Prozessrechen-systemen*. Begriffe. Berlin: Beuth, 1998.

DIN EN ISO 14644-4

DIN EN ISO 14644-4:2001: *Reinräume und zugehörige Reinraumbereiche. Teil 4: Planung, Ausführung und Erstinbetriebnahme*. Berlin: Beuth, 2003.

Erlach 2007

Erlach, K.: *Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik*. Berlin: Springer, 2007.

FiT 2007

Fachverband industrielle Teilereinigung e.V.: *Reinigung sichert Qualität. Reinigung metallischer Bauteile-Grundlagen*. In: JOT (2007), Nr. 6, S. 42-44.

Foitzik 2002

Foitzik, Bernhard: *Sauberkeit kommt vom Fachmann*. In: JOT (2002) Nr. 3, S. 26-28.

Friedrich 2006

Friedrich, T.: *Wertstromanalyse in der Automobillogistik. Verschwendung erkennen – Potenziale erschließen*. In: *Logistik: Erfolgsfaktor der Zukunft*. Hrsg.: VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik. Düsseldorf: VDI, 2006, S. 33-37.

Frühwald 1990

Frühwald, Christian: *Analyse und Planung produktionstechnischer Rüstabläufe*. Düsseldorf: VDI, 1990.

Grün 2006

Grün, R.: *Industrielle Teilereinigung*. Vortrag im Rahmen des Fachforums auf der Messen parts2clean. Friedrichshafen, 07.-09.11.2006.

Haller 1999

Haller, M.: *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Großserienproduktion*. München: Herbert Utz, 1999.

Haase u. a. 1996

Haase, B; Brunn, K.; Grün, R.; Hasler J.; Kunz U.; Stedry B.: *Bauteilreinigung – Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen. Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen*. Renningen-Malsheim: Expert-Verlag, 1996.

Haase 2007

Haase, Brigitte: Reinigung metallischer Bauteile-Grundlagen. *Reinigung sichert Qualität*. In: JOT (2007) Nr. 6, S. 42-44.

Hasler 1997

Hasler, J.: *Wirtschaftliche Spülprozesse*. In: Metalloberfläche 50 (1996), Nr.10, S. 760-770.

Hammer 1994

Hammer, H.: *Flexible Fertigungssysteme im Lean Trend*. In: wt-Produktion und Management 84 (1994), Nr.3, S. 85-90.

Henze 2010

Henze, N: *Stochastik für Einsteiger. Eine Einführung in die faszinierende Welt des Zufalls*. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2010.

Hittl 2002

Hittl, Marion: *Reinigung im Fertigungstakt*. In: JOT (2002), Nr. 7, S. 34-36.

Hornemann und Modrich und Schmierer 1999

Hornemann, M.; Modrich, K.-U.; Schmierer, G.: *Reinigung als Kostenfaktor in Produktion und Dienstleistung*. In: wt Werkstattstechnik (1999) Nr.4, S.171-173.

Jelinek 1999

Jelinek T. W.: *Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie*. Saulgau: Eugen G. Leuze, 1999.

Kloke 2003

Kloke, U.: *Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems*. Dortmund, Universität, Diss. 2003.

Krämer 1993

Krämer, G.: *Systematik des Reinigungsprozesses*. In: Umweltschonung und Verbesserung der Bauteilfunktion durch physikalische und chemische Reinigungsverfahren für Bauteile, Tagungsbericht der VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, 1993.

Krebs und Deuse 2010

Krebs, M.; Deuse, J.: *Resource efficient and economic parts cleaning - Requirements oriented cleaning saves resources, energy and money*. In: *Proceedings of the 4th CIRP International Conference on Competitive Manufacturing*. 03.-05. Februar 2010, Stellenbosch, Südafrika, S. 165-170.

Krieg 2007

Krieg, M.: *Markt- und Trendanalysen in der industriellen Teilereinigung*. Berlin: Fraunhofer Allianz Reinigungstechnik c/o IPK, 2007.

Lay und Schirrmeister 2001

Lay, G.; Schirrmeister, E.: *Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2001.

Martin 1989

Martin, J.: *Gruppentechnologische Fertigungsstrukturen. Planung und Bewertung bei Einzel- und Kleinserienfertigung*. Dortmund, Universität, Fakultät Maschinenbau, Diss. 1989.

Menzel 2009

Menzel F.: *Produktionsoptimierung mit KVP: der kontinuierliche Verbesserungsprozess für gesteigerte Konkurrenzfähigkeit*. München: FinanzBuch, 2009.

Merz 1994

Merz, M.: *Ausschöpfung von Rationalisierungsreserven durch den Einsatz von Handhabungssystemen*. In: Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft. Symposium Automatisierungstechnik in der Keramischen Fertigung. 8./9. Dezember 1993, Bayreuth.

Monden 1998

Monden, Yasuhiro; *Toyota Production System*. 3. Aufl. Georgia: Engineering & Management Press, 1998.

Peterson 1997

Peterson, D.: *Practical Guide to Industrial Metal Cleaning*. München: Hanser, 1997.

REFA 1991

REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: *Methodenlehre der Betriebsorganisation. Arbeitsgestaltung in der Produktion*. München: Carl Hanser, 1991.

Richard 2009

Richard, Tim: *Entwicklung eines internetbasierten Wissensmanagementsystems für die reinigungsgerechte Konstruktion*. Dortmund, Universität, Fakultät Maschinenbau, Diss. 2009.

Rochowicz und Krieg 2004

Rochowicz, Markus; Krieg, Mark C.: *Auf hohem Niveau. Anforderungen der Automobilindustrie an die Reinigungstechnik*. In: *mo* (2004), Nr. 5, S. 29-31.

Rochowicz und Ernst und Schmauz 2009

Rochowicz, Markus; Ernst, Christian; Schmauz, Günther: *Sauber ist oft schon reinigung*. In: *JOT* (2009) Nr. 3, S. 60-63.

Rother und Harris 2004

Rother, M.; Harris, R.: *Kontinuierliche Fließfertigung organisieren*. Aachen: LeanManagement Institut, 2004.

Rother und Shook 2000

Rother, M.; Shook, J.: *Sehen lernen. Mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Stuttgart: LOG_X, 2000.

Schmidt 1996

Schmidt, J.: *Untersuchung zur Reinheit spanend bearbeiteter Oberflächen unter besonderer Berücksichtigung des erzeugenden Prozesses*. Saarbrücken, Universität, Diss. 1996.

Schnieder 1999

Schnieder, E.: *Methoden der Automatisierung. Betriebsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*. Braunschweig: Vieweg, 1999.

Schulz 2006a

Schulz, Doris: *Einfluss der Logistik auf die Reinheit von Werkstücken. Wie sauber kommen die Teile zum Kunden*. In: *JOT* 46 (2006) Nr. 4, S. 18-19.

Schulz 2006b

Schulz, Doris: *Bedarfsgerechte Reinigung. Potenzial für mehr Qualität und Wirtschaftlichkeit*. In: JOT (2006), Nr. 10, S. 98-102.

Schulz 2006c

Schulze, Doris: *Industrial Parts Cleaning Becoming Encreasingly Popular*. In: Process Cleaning Magazine (2006), Nr. 5, S. 26-28.

Schuh 2006:

Schuh, G.: *Produktionsplanung und –steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2006.

Sekine 1995

Sekine, Kenichi; Arai, Keisuke: *Kaizen für schnelles Umrüsten*. Landsberg: Mi, 1995.

Shingo 1989

Shingo, S.: *A study of the toyota produktion system*. Re-Translated Edition. Cambridge: Productivity Press, 1989.

Takeda 2004

Tekada, Hitoshi: *Das synchrone Produktionssystem*. 4. Aufl. Frankfurt: Redline, 2004.

VDA 19

Verband der Automobilindustrie e. V: *Prüfung der Technischen Sauberkeit. Partikelverunreinigungen funktionsrelevanter Automobilteile*. 1. Aufl., Frankfurt am Main 2004.

VDA 19.2

Verband der Automobilindustrie e. V: *Technische Sauberkeit in der Montage Teil 2. Umgebung, Logistik, Personal und Montageeinrichtungen*. 1. Aufl., Frankfurt am Main: 2010.

VDI 2222

VDI-Richtlinie 2222: *Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Berlin: Beuth, 1997.

VDI 2860

VDI-Richtlinie 2860: *Montage- und Handhabungstechnik*. Berlin: Beuth, 1990.

Vollrath 2000

Vollrath, K.: *Schütteln statt Waschen. Verringerung von Badverschleppungen*. In: mo (2000), Nr. 8, S. 14-15.

Westkämper 2006

Westkämper, E.: *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin: Springer, 2006.

Wiendahl 2005

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 5. Auflage. München : Hanser, 2005.

Wiendahl und Frühwald 1990

Wiendahl, H.-P.; Frühwald, C.: *Rüstabläufe - Analyse und Planung*. In: wt Werkstattstechnik 80 (1990), Nr. 13, S. 26-28.

Wischniewski 2010

Wischniewski, S. M.: *Rüstaufgaben-Taxonomie zur Ermittlung menschlicher Fehlerwahrscheinlichkeiten in der variantenreichen Serienfertigung*. Dortmund, Universität, Fakultät Maschinenbau, Diss. 2010.

Wullstein 2004

Wullstein, M.: *Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen*. Dortmund, Universität, Diss. 2004.

Anhang A

Datenbogen ViReBa

1. Reinheit:

- Anforderungen
 - Grobreinigung
 - Reinigung
 - Feinreinigung
 - Feinstreinigung
 - Max. Partikelanzahl/-größe : Stück / μm
 - Max. Oberflächenspannung : N/mm²
 - Max. Gewicht des Restschmutz : mg/Bauteil
- Sauberkeit : partiell /komplett
- Trocknung erforderlich : ja / nein
- Sauberkeitsprüfung
 - Umfang :
 - Spezifikation :
 - Verfahren :

2. Bauteil:

- Geometrie
 - Abmessungen
 - B/H/T : mm / mm / mm
 - ∅ : mm
 - Hüllvolumen : mm³
 - Merkmale
 - Hinterschneidungen
Anzahl / Größe : / mm
 - Kavitäten: Anzahl / Größe : / mm
 - komplizierte Geometrie :
 - Biegekanten (Anzahl) :
 - poröse Oberfläche :
 - glatte Flächen :
 - Überlappungen :
 - Durchgangsbohrung
Anzahl / Durchmesser : / mm
 - Sackbohrung
Anzahl / Durchmesser : / mm
 - Gewinde :
- Bauteilgewicht : kg
- Werkstoff :
- Oberflächengüte : Rz / Ra

- Beschichtung vorhanden : ja / nein
 - Wenn ja, welche
 - keine
 - Anstrich/Lackierung
 - Kunststoffbeschichtung
 - Pulverbeschichtung
 - Galvanischer Überzug
 - Andere Beschichtung
 - Beschichtung entfernen : ja / nein
- Bauteil gesintert/aus Pulver gepresst : ja / nein
- Variantenanzahl/ Teilefamilien : /
- Gefahr der Alterung
 - Durch Lagern
 - Durch Wärmebehandlung oder -einwirkung

3. Verschmutzung:

- Art
 - Partikel :
 - Öl :
 - Fett :
 - Späne :
 - Oxidschicht :
 - Korrosionsprodukt/Zunder :
 - Kühlschmierstoff :
 - (Kreide-) Markierungen :
 - Staub :
- Zusammensetzung
 - Fest
 - Flüssig
- Menge : g /Bauteil
 - Alternativ grobe Beurteilung
 - Bauteile stehen in Öl/Schmutz
 - Bauteile sind stark verschmutzt
 - Bauteile sind leicht verschmutzt
 - Bauteile sind nach Augenschein sauber
- Dicke der Schmutzschicht : µm
- Magnetismus : ja / nein
- Verschmutzung nur lokal : ja / nein
- Reinigung enger Spalte (<1mm) erforderlich : ja / nein

4. Wertstrom:

- Allgemeine Angaben zum Wertstrom
 - Stückzahl : Stück
 - Losgröße : Stück
 - Durchlaufzeit : Sek.
 - Fertigungstakt : Sek.
 - Fertigungsprinzip :
 - Schichtmodell :
 - Reinigungsdauer : Sek.
 - Rüsthäufigkeit/-dauer : / Min.
 - Verfügbarkeit des Fertigungssystem : %
- Vorgelagerte Prozesse/Verfahren
 - Bearbeitungsart (Verfahren) : Drehen / Fräsen / Bohren / Schleifen / Pressen / Stanzen / sonstiges
 - Bearbeitungsart (KSS) : nass / trocken / Minimalmengenschmierung
 - Kühlmittel
 - -art :
 - -temperatur : °C
 - -viskosität : mm²/s bei 20°C
 - Werkstücke schöpfend : cm³/Werkstück
 - Bearbeitungszeit je Bauteil : Sek.
 - Beladungszeit je Bauteil : Sek.
 - Zuführung der Werkstücke in die Werkzeugmaschine vorhanden : ja, welche Art / nein
 - Entnahme der Werkstücke aus der Werkzeugmaschine vorhanden : ja, welche Art / nein
 - Temperatur des Bauteils nach Bearbeitung : °C
- Nachgelagerte Prozesse/Verfahren
 - Bearbeitungsart (Verfahren) : Drehen / Fräsen / Bohren / Schleifen / Montage / Lackieren / Beschichten / Schweißen / Härten / sonstiges
 - Bearbeitungsart (KSS) : nass / trocken / Minimalmengenschmierung
 - Kühlmittel
 - -art :
 - -temperatur : °C
 - -viskosität : mm²/s bei 20°C
 - Werkstücke schöpfend : cm³/Werkstück
 - Bearbeitungszeit je Bauteil : Sek.
 - Beladungszeit je Bauteil : Sek.
 - Zuführung der Werkstücke in die Werkzeugmaschine vorhanden : ja, welche Art / nein
 - Entnahme der Werkstücke aus der Werkzeugmaschine vorhanden : ja, welche Art / nein

- Max. Temperatur des Bauteils
vor Bearbeitung : °C
- Werkstückpuffer vorhanden
 - vor der Reinigung :
 - nach der Reinigung :
- Sicherheitsabschränkungen vorhanden :

5. Rahmenbedingungen:

- Umgebung/Umwelt
 - Umgebungstemperatur : °C
 - Relative Luftfeuchtigkeit : % bei + °C
 - Sonstiges :
- Layout :
- Platz für Reinigung und Handhabung : m²
- Vorhandene elektrische und pneumatische Infrastruktur:
 - Netzform :
 - Netzspannung : V
 - Netzfrequenz : Hz
 - Wechselspannung :
 - Gleichspannung :
 - Steuerspannung Elektronik : V
 - Druckluftversorgung vorhanden : ja /nein
 - Nenndruck: : bar
- Verfügbares Personal
 - Qualifikation :
 - Aufgaben
 - Wartung :
 - Bedienung :
 - Handhabung :
- Aufbereitung für abgereinigte Medien
und Reinigungsmedium :

6. Handhabung:

- Logistik
 - Transport zur und von der Reinigungsanlage :
 - Häufigkeit :
 - Transportbehälter :
 - Verpackungsart :
 - Gebindegröße :
- Bereitstellung
 - OZ :
 - Entfernung zur Reinigungsanlage : m
 - Art :
 - Zuführung vorhanden :
- Ablage
 - OZ :
 - Entfernung zur Reinigungsanlage : m
 - Art :
 - Abführung vorhanden :
- Lage der Greifflächen am Bauteil :
 - Greifflächen empfindlich : ja /nein
 - wenn ja: Reinigung vor dem Greifen erforderlich : ja /nein
- Anzahl der erforderlichen Achsen zum Beladen der Reinigungsanlage
 - Linear : X / Y / Z
 - Rotation : um X / um Y / um Z
- Ausrichten des Werkstücks vor dem Beladen der Reinigungsanlage erforderlich
 - Translatorisch : X / Y / Z
 - Rotatorisch : um X / um Y / um Z

7. Spezielle Anforderungen:

- Kosten
 - Investition (max.) : €
 - Betrieb : €/a
 - Entsorgung : €/a
 - Kosten pro Werkstück : € / Werkstück
 - Amortisationsdauer : a
- Maximaler Energieverbrauch : kW
- Dauer Anlagenanlauf : Monate

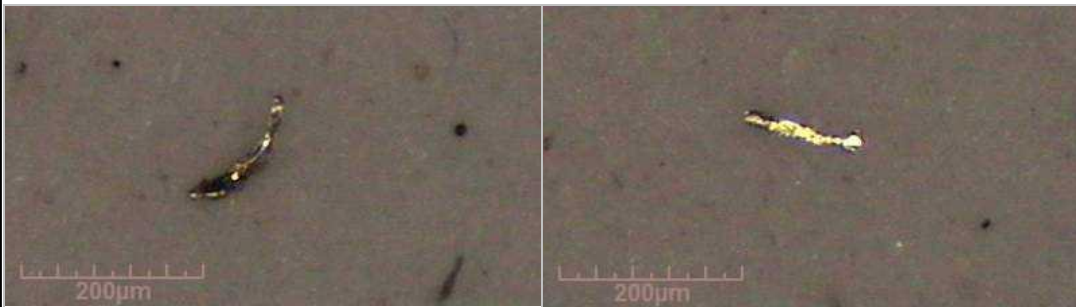
- Schnittstellen zur Fremdsteuerung
 - Entladung Werkzeugmaschine
 - Werkstück transportbereit :
 - Beladeautomation außer Gefahrenbereich :
 - Werkstück abgeholt :
 - Werkstückdaten (Programmnr.) :
- Betriebsmittelvorschriften/Freigabelisten des Endkunden beachten : ja /nein
- Umfang der Dokumentation
 - Sprache :
 - Wartungs-/Bedienungsanleitung :
 - Ersatzteil- und Verschleißteillisten :
 - FMEA :
 - Risiko- und Gefahrenanalyse :
- Wartung
 - Service :
 - Wartungszyklen :
 - Instandhaltung :
 - Robustheit/Langlebigkeit :

8. Skizze/Aufstellplan:

Anhang B

Technische Sauberkeit nach VDA Bd. 19							
Prüfgegenstand							
Bauteil:	Flansch			Entnahmedatum:			
Bauteil-Nr.:	Testteile 1-5			Prüfer:		Oeken / Krebs	
Proben-Nr.:				Prüfdatum:		15.04.2010	
Kunde:	vibro-tec						
Extraktion							
Verfahren:	Spritzen			Anzahl Teile:		5	
Spüflüssigkeit:	DE-SOLV-IT 1000			Oberfläche Bauteil [cm ²]			
Menge [Liter]:	400			Filterart:			
Gewicht [mg]:							
Mikroskopische Analyse							
Maßstab:	X:6,2 µm/Pxl		Y:6,2 µm/Pxl		Auswertedurchmesser [mm]:		44,0
Größter metallischer Partikel				Länge[µm]	149	Breite [µm]	26
Größter nichtmetallischer Partikel ¹				Länge[µm]	353	Breite [µm]	62
Faserige Anteile ²				Länge der größten Faser [µm]:	1722	Gesamtlänge Fasern [mm]:	7,57
		Partikelanzahl ¹ auf Filtermembran		Partikelanzahl ¹ pro Bauteil		Partikelanzahl ¹ pro 1000 cm ²	
Partikelgröße [µm]	Code	Insgesamt ¹	Metallisch	Insgesamt ¹	Metallisch	Insgesamt ¹	Metallisch
Zusammengefasste Statistik:							
> 600	J-K	0	0	0,0	0,0		
100 - 600	F-I	49	5	9,8	1,0		
15 - 100	C-E	3729	170	745,8	34,0		
Ausführliche Statistik:							
> 1000	K	0	0	0,0	0,0		
600 - 1000	J	0	0	0,0	0,0		
400 - 600	I	0	0	0,0	0,0		
200 - 400	H	6	0	1,2	0,0		
150 - 200	G	11	0	2,2	0,0		
100 - 150	F	32	5	6,4	1,0		
50 -100	E	237	42	47,4	8,4		
25- 50	D	1325	97	265,0	19,4		
15 - 25	C	2167	31	433,4	6,2		
5 - 15	B	7130	17	1426,0	3,4		
CCC¹ (Component Cleanliness Code):							
¹ : Partikel ohne Fasern gezählt ² : Definition Faser: Nichtmetallisch, Kompaktheit < 30 % oder Länge/Breite > 10.							
Bemerkungen:							

Bildmaterial:



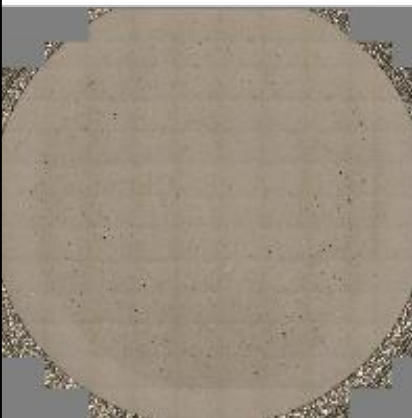
Größter metallischer Partikel

Zweitgrößter metallischer Partikel



Größter nichtmetallischer (nichtfaseriger) Partikel

Zweitgrößter nichtmetallischer Partikel



Filterübersicht



Größte Faser