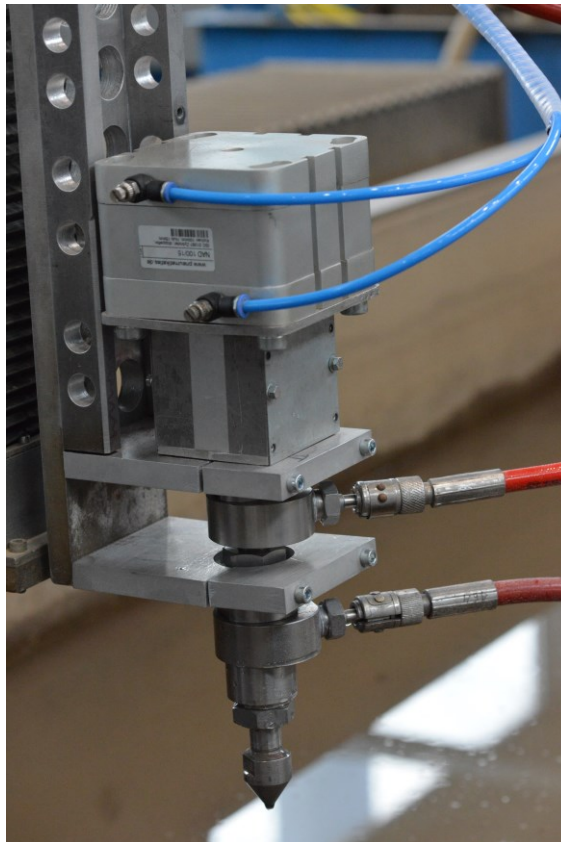


Leibniz Universität Hannover

Förderkennzeichen 03THWNI006

## Entwicklung eines Schneidventils zum Schalten von Suspensionen für das Wasserstrahlschneiden



Sachbericht 01.03.2021 – 31.05.2023

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Inhaltsverzeichnis**

1. Aufgabenstellung .....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
4. Stand von Wissenschaft und Technik .....	5
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	10
6. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse .....	10
7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	54
8. Begründung zur Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	55
9. Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	55
10. Veröffentlichungen .....	55
11. Literatur.....	57

## **1. Aufgabenstellung**

Die Aufgabenstellung zum Vorhaben „Schaltventil für Suspensionen“ ist die Entwicklung eines Schneidkopfes für das Wasserabrasivsusensionsstrahlschneiden (WASS), der es ermöglicht, den Schneidprozess durch einen Schaltvorgang zu unterbrechen und wieder zu starten ohne den gesamten Druckbehälter über den Schneidkopf leeren zu müssen. Dabei soll das Schaltventil kompakt und somit möglichst universell einsetzbar ausgeführt werden, sodass es sowohl für stationäre, als auch mobile Anwendungen zum Einsatz kommen kann. Es soll als ein einziges Teil ausgeführt werden, sodass das Zusammenschalten von mehreren Einzelkomponenten entfällt. Die Funktion soll sicher und reproduzierbar gewährleistet sein und erprobt werden. Darüber hinaus soll die Schaltzeit weniger als zwei Sekunden betragen, um mit dem Schaltvorgang beim Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden konkurrieren zu können. Der Schneidkopf soll im Rahmen dieses Projekts basierend auf der Erfindung welche in der Patentanmeldung 2020052813584300DE beschrieben ist, entwickelt, gefertigt und erprobt werden und somit als vollumfänglich funktionsfähiger Demonstrator dienen.

## **2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Institut für Werkstoffkunde ist als Einrichtung der Leibniz Universität Hannover ausgestattet mit Mitteln der Grundausrüstung, welche zusätzlich zu den Fördermitteln für dieses Projekt zur Bearbeitung bereitgestellt wurden. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Beistellung der notwendigen Infrastruktur für das Forschungsprojekt, wobei insbesondere die IW-Werkstätten die Fertigungsaufgaben zur Herstellung der Bauteile für die Ventilprototypen betrafen. Ebenfalls wurden alle notwendigen Mittel zur Nutzung von Software und Rechnerinfrastruktur durch die Universität getragen. Durch die Ergänzung der bewilligten Mittel durch die Universität, den Beitrag des Landes Niedersachsen und den Beitrag des beteiligten Industrieunternehmens (Fa. Perndorfer) konnte das Forschungsprojekt wie geplant durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen werden.

## **3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Um den Suspensionsstrahl für fertigungstechnische Anwendungen einsetzen zu können, soll im Rahmen dieses Vorhabens ein Schaltventil zum Schalten von Suspensionen, für die industrielle Anwendung entwickelt werden. Das Gesamtziel des Vorhabens



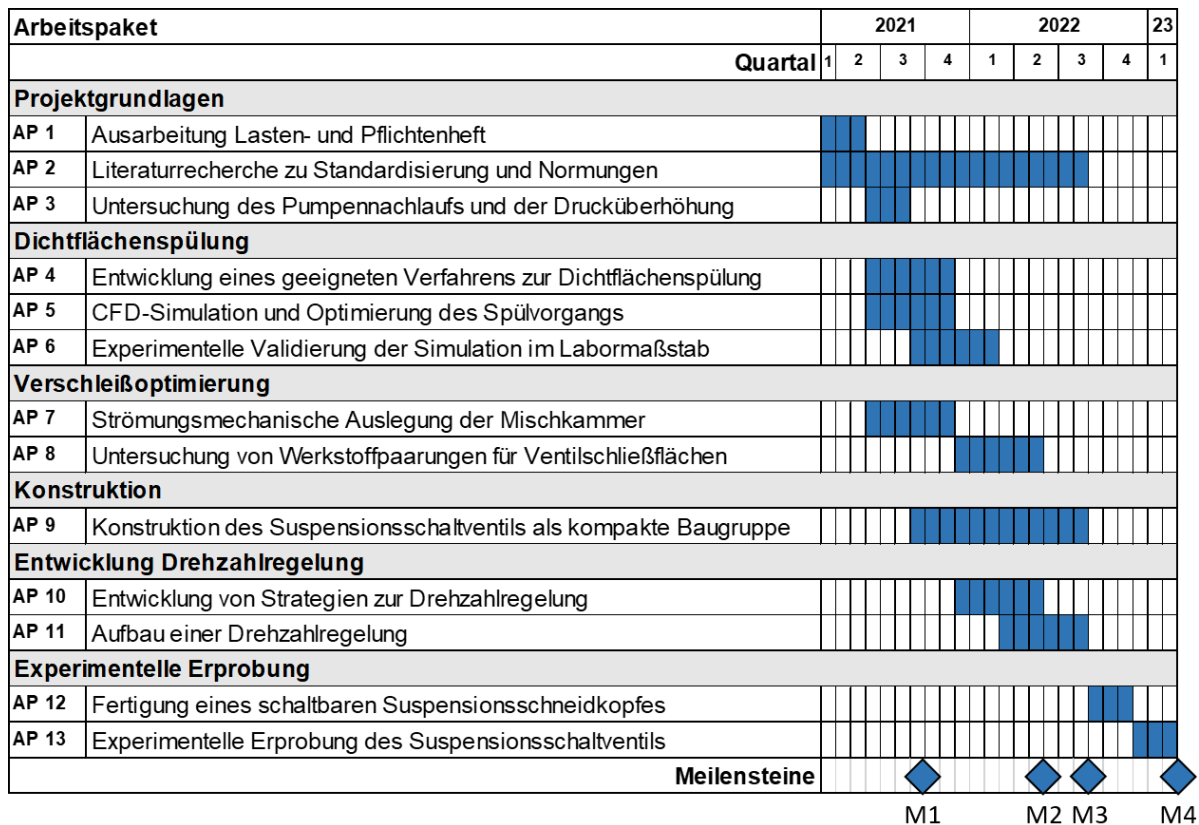


Abbildung 1: Arbeitsplan des Forschungsvorhabens zur Entwicklung eines Ventils zum verschleißarmen Schalten von Suspensionen.

#### 4. Stand von Wissenschaft und Technik

Das Wasserstrahlschneiden wird industriell als vielseitiger Trennprozess eingesetzt. Aufgrund einiger alleinstellender Vorteile ist das Verfahren weit verbreitet. Es zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass im Prozess entstehende Wärme durch das Strahlmedium Wasser unmittelbar wieder abgeführt und die Prozesszone damit nicht thermisch belastet wird. Es eignet sich außerdem zum Trennen aller technisch relevanten Werkstoffe, da es keine Anforderungen an elektrische oder thermische Leitfähigkeit, Oberflächenbeschaffenheit oder optische Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs stellt. Der Überbegriff Wasserstrahlschneiden umfasst im Wesentlichen drei Verfahrensvarianten: Das Reinwasserstrahlschneiden (RWS), das Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden (WAIS) sowie das Wasserabrasivsuspensionsstrahlschneiden (WASS) (vgl. Abbildung 2).

# Wasserstrahlschneiden

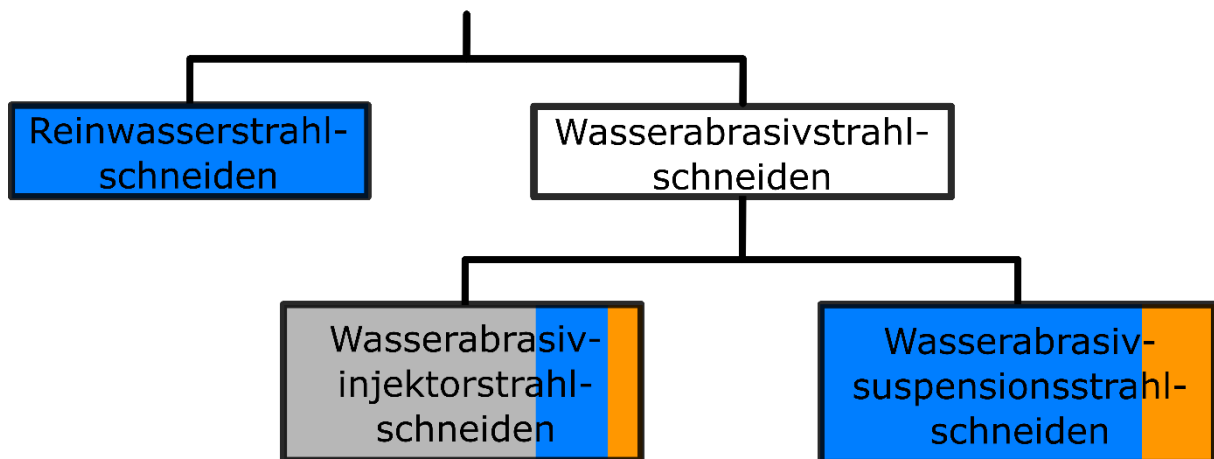


Abbildung 2: Einteilung des Wasserstrahlschneidens in seine Verfahrensvariante. Farbcode: Anteile von Wasser (blau), Luft (grau) und Abrasiv (gelb) im Strahl.

Die unterschiedlichen Varianten verfügen über spezifische Vor- und Nachteile und eignen sich entsprechend für unterschiedliche Anwendungen. Unabhängig von der Verfahrensvariante wird für alle Wasserstrahlschneidprozesse verdichtetes Wasser benötigt. Dieses wird durch Hochdruckpumpen auf einen Druck von bis zu 600 MPa verdichtet. Das Wasser wird durch ein Rohrleitungssystem zum Schneidkopf transportiert, in welchem es durch eine Düse auf atmosphärischen Druck entspannt wird. Dabei wird die Wasserströmung auf bis zu 900 m/s beschleunigt und der eigentliche Wasserstrahl wird geformt. Beim RWS wird ausschließlich dieser Hochgeschwindigkeitswasserstrahl zum Trennen des Werkstücks verwendet. Das Materialgefüge wird dabei lediglich durch die erosive Wirkung des Wassers zerstört. Das Verfahren eignet sich insbesondere zum Trennen von weichen Werkstoffen und zeichnet sich dabei um eine hohe Genauigkeit aus. Zur Erhöhung der Schneidleistung wird dem Wasserstrahl nach seiner Erzeugung in der industriellen Anwendung meistens ein Abrasiv zugeführt.

Das Abrasiv wird unter atmosphärischem Druck zudosiert und wird durch den Venturi-Effekt in den Hochgeschwindigkeitswasserstrahl gesogen. Aufgrund dieser Zuführungsstrategie wird das Verfahren als Wasserabrasivinjektorstrahlschneiden bezeichnet (vgl. Abbildung 3). Der resultierende Wasserabrasivstrahl ermöglicht das Trennen nahezu aller Werkstoffe. Das Trennen erfolgt vorrangig durch die Mikrozerspannung der einzelnen Abrasivpartikel. Der Wasserstrahl selbst dient lediglich noch als Trägermedium und zur Beschleunigung der Partikel. Neben den Abrasivpartikeln wird beim

WAIS noch Luft in den Strahl eingebracht, welcher einen Anteil von 90 % am resultierenden Wasserabrasivstrahl hat. Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Dichte und ihrer geringen Anfangsgeschwindigkeit, wirkt sich diese negativ auf die Beschleunigung des Abrasivs im Strahl und damit die Schneidleistung aus.

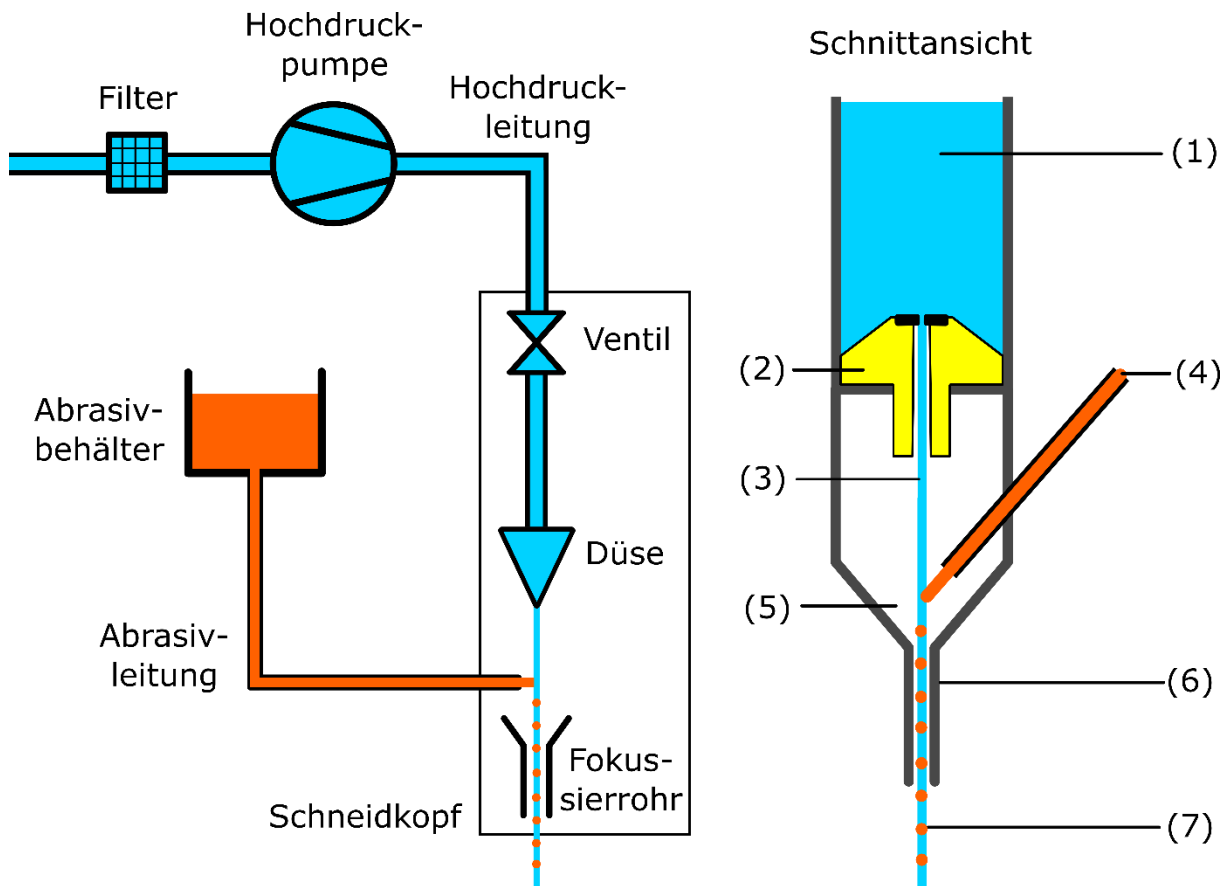


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wasserabrasivinjektorstrahlschneidens (WAIS)

Der Nachteil des hohen Luftanteils im Wasserabrasivstrahl kann durch die Zuführung des Abrasivs im Hochdruckteil vermieden werden. Dazu werden Wasser und Abrasiv in einem Druckbehälter zu einer Suspension vermischt und gemeinsam durch eine Hartmetalldüse beschleunigt. Durch die simultane Beschleunigung von Wasser und Abrasiv entsteht nahezu kein Schlupf zwischen den beiden Phasen. Der resultierende Wasserabrasivstrahl besteht nur aus diesen beiden Phasen und enthält keine Luft. Entsprechend verfügt das WASS über einen höheren Wirkungsgrad im Vergleich zum WAIS. Dadurch ist es möglich, bei gleicher Anlagenbaugröße eine höhere Schneidleistung zu erzielen oder bei gleicher Schneidleistung kompaktere Anlagen einzusetzen. Durch den höheren Wirkungsgrad verfügen WASS Anlagen besonders im Sinne einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Industrie eine ausgeprägte Zukunftsfähigkeit.

Den Vorteilen stehen jedoch auch einige verfahrensbedingte Nachteile entgegen. Neben hohen Investitions- und Ersatzteilkosten ist das insbesondere die Begrenzung der möglichen Anwendungen. Aufgrund der Kompaktheit der Anlagen wird das WASS nach dem aktuellen Stand der Technik fast ausschließlich für mobile Anwendungen eingesetzt. Dabei sind in der Regel reine Trennschnitte gefordert, beispielsweise beim Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen. Bedingt durch den hohen Wirkungsgrad und die daraus resultierende hohe Energiedichte im Wasserabrasivstrahl eignet sich das Verfahren jedoch grundsätzlich auch zur Durchführung von Qualitätsschnitten und damit dem stationären, fertigungstechnischen Einsatz. Eine Herausforderung wurde dabei bereits durch das Fortschreiten der technischen Entwicklung bewältigt: Als Alternative zu der üblichen diskontinuierlichen Abrasivzuführung (vgl. Abbildung 4) und der damit einhergehenden Begrenzung der Schnittzeit existieren auf dem Markt mittlerweile Anlagen, welche eine kontinuierliche Abrasivzuführung und damit eine theoretisch unendlich lange Schnittzeit ermöglichen.

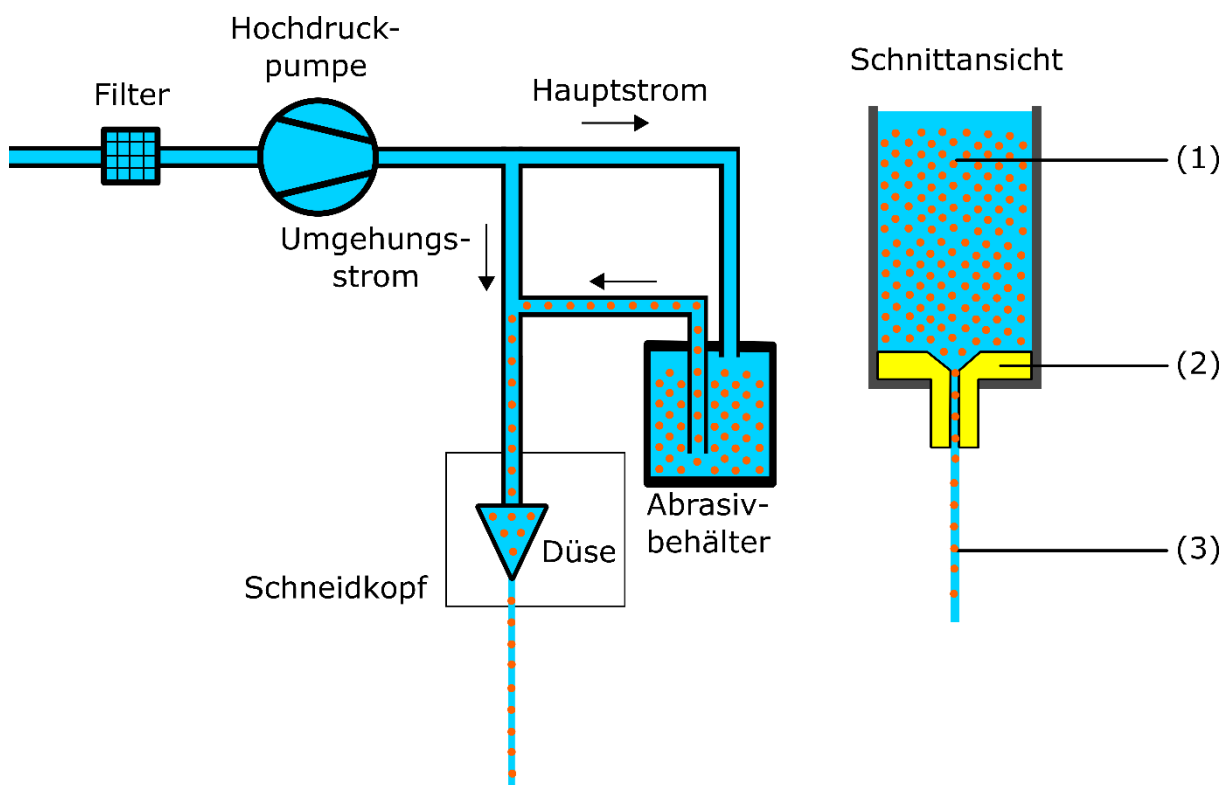


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Aufbaus einer gewöhnlichen Anlage Wasserabrasivstrahlchneidens (WASS) ohne Schaltventil

Es verbleibt eine weitere Herausforderung, welche den Einsatz des WASS in der Fertigungstechnik erschwert bzw. in der breiten Anwendung verhindert: Durch das im

Wasser transportierte Abrasiv ist ein schnelles Freigeben und Unterbrechen des Wasserabrasivstrahls nicht wie beim WAIS möglich. Die dafür notwendige Verwendung von Schaltventilen ist nicht möglich, da sich stets Abrasivpartikel zwischen den Dichtflächen befinden und den dichtenden Kontakt somit verhindern. Ohne dynamische und flexible Schneidunterbrechung ist u. a. keine Fertigung von Innenkonturen möglich. Um diese Herausforderung zu bewältigen und das WASS damit für den fertigungstechnischen Einsatz zu qualifizieren, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Schaltventil entwickelt, welches durch eine integrierte Dichtflächenspülung ein Ventilschließen reproduzierbar bei geringem Komponentenverschleiß ermöglicht. Dazu wird unmittelbar nach dem Pumpenauslass ein weiterer Bypass vorgesehen, welcher lediglich Reinwasser führt (vgl. Abbildung 5).

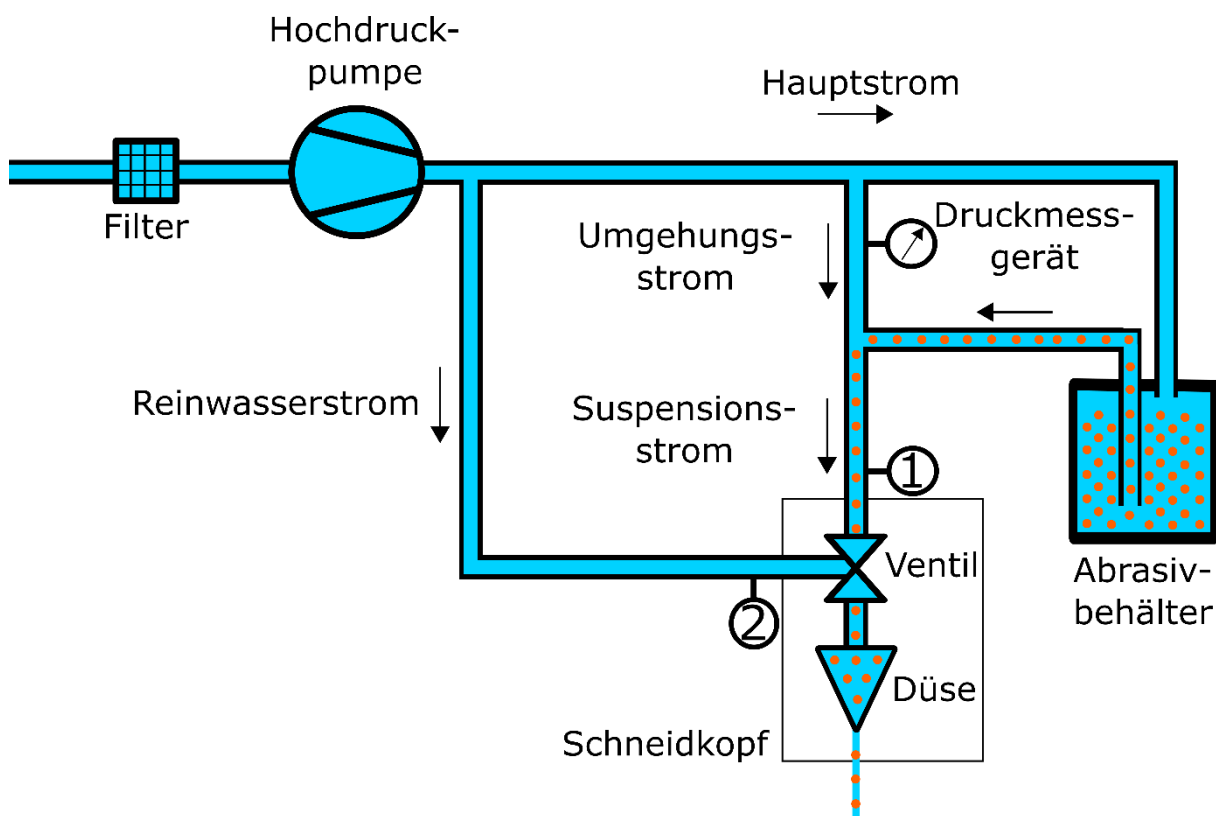


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines WASS Systems mit Reinwasserbypass für die Verwendung mit Schaltventil mit integrierter Dichtflächenspülung

Durch die Entnahme des Reinwasserstroms unmittelbar nach dem Pumpenauslass ist dieser vergleichen mit dem Hauptstrom, welcher den Druckbehälter mit dem Abrasiv spült, nur geringen Rohrreibungsverlusten unterworfen. Der Reinwasserstrom verfügt somit physikalisch bedingt stets über einen höheren Druck, als der Suspensionsstrom. Dies gilt unabhängig vom Betriebsdruck. Dadurch wird die Verdrängung der Suspension durch das Reinwasser und damit eine Dichtflächenspülung ermöglicht.

## **5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Vorhaben wurde in Zusammenarbeit mit der Perndorfer Maschinenbau KG durchgeführt. Der Perndorfer Maschinenbau KG förderte das Vorhaben mit einem Gesamtvolumen von 18.000 €. Innerhalb des Vorhabens ist die Perndorfer Maschinenbau KG beratend tätig geworden. Augenmerk lag dabei auf der Übertragbarkeit der Arbeitsergebnisse in die industrielle Anwendung. Expertisen und Erfahrungen aus der Industrie flossen somit in den Entwicklungsprozess im Rahmen dieses Vorhabens ein. Die Expertisen des Projektpartners wurden vor Allem bei der Fertigung hochdruckfester Bauteile bei möglichst geringer Baugröße sowie der Anlagensteuerung erfolgreich genutzt. Dabei war die Kenntnis und die Erfahrung des Unternehmens in Bezug auf die Anlagensicherheit von herausragender Bedeutung, um Industriestandards im Rahmen der Entwicklung frühzeitig umzusetzen. Des Weiteren war die Kompetenz im Bereich der Integration von neuen Funktionen in ein Maschinenkonzept bis hin zur Software-Applikation der Steuerung für den Automatisierungsprozess von erheblicher Bedeutung. Schlussendlich konnten die Beratungen den Forschungsansatz auch hinsichtlich der Anforderungen zur Aufgabenerfüllung des Ventils beim WASS schärfen.

## **6. Eingehende Darstellung der Projektergebnisse**

### AP 1: Ausarbeitung Lasten- und Pflichtenheft

Um mit dem WAIS, welches das industrielle Standard Wasserstrahlschneidverfahren darstellt, konkurrieren und die verfahrensspezifischen Vorteile im Wirkungsgrad des WASS nutzen zu können, muss sich ein Schaltventil für das WASS in Dimension, Leistungsfähigkeit und Standzeiten mit Ventilen für das WAIS messen. Idealerweise ist für den Anwender kein Unterschied in Bedienung, Montage und Instandhaltung wahrnehmbar. Dazu werden die Anforderungen in übergeordnete Anforderungskategorien eingeordnet. Untergeordnet werden Zielgrößen in Anlehnung an artverwandte und kommerziell verfügbare formuliert. Die Aufteilung der Anforderungsliste erfolgt in die folgenden Kategorien:

- Geometrie
- Masse
- Mechanik/Kinematik
- Beanspruchungen
- Kräfte/Drücke

- Antriebe
- Anschlüsse
- Steuerung
- Nutzung
- Werkstoffe
- Fertigung Montage
- Instandhaltung
- Funktionsüberprüfung

Durch die Anlehnung an diese etablierten Technologien wird die Akzeptabilität beim Anwender durch die Adaptierbarkeit an kommerzielle Führungssysteme gesteigert und damit eine Markteinführung erleichtert. Größtmögliche Schnittmengen zwischen etablierten und neu entwickelten Systemen verringert die notwendigen Adaptions- und Investitionskosten für die Markteinführung und wirkt sich somit potenziell positiv für die Erlangung einer stabilen Marktposition aus.

Nachfolgend sind die Anforderungen an das Schaltventil zum verschleißarmen Schalten von Suspensionen tabellarisch dargestellt. Die jeweiligen den Kategorien zugeordneten Anforderungen sind jeweils mit Zielgrößen aufgeführt. Diese stellen Orientierungshilfen für die weitere Konstruktion dar und müssen je nach Art der Anforderung zwingend erreicht (Festforderung F) oder übertroffen werden (Mindestforderung M). Anforderungen können zudem lediglich angenähert werden (Zielforderung Z). Bei diesen wird angestrebt, sich in der Auslegung der jeweiligen Zielgröße möglichst gut anzunähern. Die vierte und letzte Art der Forderung ist die Wunschforderung (W), welche nach Möglichkeit im Auslegungsprozess berücksichtigt werden kann. Die Berücksichtigung ist jedoch vollständig optional.

Tabelle 1: Lasten- und Pflichtenheft für ein Schaltventil für das Wasserabrasivsusensionsstrahlschneiden

Anforderungsliste			
Projekt: Schaltventil für das Wasserabrasivsusensionsstrahlschneiden			
Nr.	Art	Anforderung	Werte / Daten
		<b>Geometrie</b>	
1	F	Kompakt	
2	F	Integration des Schaltventils in einen Schneidkopf	
3	M	Höhe	< 400 mm

4	M	Breite	< 150 mm
5	M	Tiefe	< 150 mm
		<b>Masse</b>	
6	M	Maximalgewicht	< 10 kg (von kommerziellen Führungsmaschinen tragbar)
		<b>Mechanik/Kinematik</b>	
7	F	Funktionsprinzip des Schaltventils	Basierend auf Patent DE 10 2014 100 839 B4
8	Z	Anzahl Antriebe	1
9	W	Ventilart	Nadelventil
10	M	Schaltzeit	< 2 Sekunden
11	M	Spülzeit der Dichtflächen	< 2 Sekunden
12	F	Spülstrategie	Mit der Strömungsrichtung der Suspension
13	F	Reproduzierbarer Schaltvorgang	
14	Z	Optimierter Spülvorgang	Durch CFD-Simulation
		<b>Beanspruchungen</b>	
15	F	Korrosionsbeständigkeit gegen Wasser	
		<b>Kräfte / Drücke</b>	
16	F	Betriebsdruck	45 MPa
17	M	Drucküberhöhung bei Schaltvorgang	< 3 MPa
		<b>Antriebe</b>	
18	W	Pneumatischer Antrieb der Ventilnadel (doppeltwirkender Zylinder)	
		<b>Anschlüsse</b>	
19	F	Durchmesser Pneumatikleitung	6 mm
20	M	Luftdruck für Pneumatik	< 0,6 MPa
21	F	Suspensionsleitung	SSKV Steckschalen-Klemmverbindung
22	F	Reinwasserleitung	SSKV Steckschalen-Klemmverbindung

		<b>Steuerung</b>	
23	F	Bedienung der Pneumatik über die Funktionstasten der Siemens LOGO!	
24	F	Bedienung der Pumpe über die Funktionstasten der Siemens LOGO!	
25	W	Anpassung der Schalt- und Spülzeiten über die Siemens LOGO!	
		<b>Nutzung</b>	
26	F	Stationäre Anwendungen	
27	F	Fertigungstechnische Anwendungen	Analog zum Wasserabrasivinjektorstrahlverfahren

28	W	Befestigung an kommerziellen Führungsmaschinen	
		<b>Werkstoffe</b>	
29	F	Ventilnadel	Korrosionsbeständiger Edelstahl (1.4571)
30	F	Ventilgehäuse	Korrosionsbeständiger Edelstahl (1.4571)
31	F	Halterungen / Befestigungen	Baustahl / Aluminium
		<b>Fertigung</b>	
32	W	Fertigungsverfahren der institutseigenen Werkstatt	
33	W	Hoher Anteil an Normteilen	SITEC HP-Druckschrauben und Druckringe
		<b>Montage</b>	
34	F	Manuelle Montage	
		<b>Instandhaltung</b>	
35	Z	Verschleißarm	
36	F	Austausch von Verschleißteilen	
37	W	Kosteneffiziente Wartung	
38	W	Herstellerunabhängige Instandhaltung	
		<b>Funktionsüberprüfung</b>	
39	F	Durchführung von Testschnitten	

Nachfolgend wird kurz auf die jeweiligen Anforderungen und deren Festlegung eingegangen.

### *Geometrie*

Die Anforderungen an die Geometrie bemessen sich nach kommerziell verfügbaren und eingesetzten Schaltventilen für artverwandte Verfahrensvarianten bzw. an den dafür ausgelegten Führungsmaschinen. Entsprechend werden maximale Dimensionen formuliert, die nicht überschritten werden dürfen. Grundsätzlich gilt, dass die Konstruktion hinsichtlich ihrer Dimensionen mehr Vorteile bietet, je kompakter sie ausgeführt wird. Als Grenzwerte für die Baugröße werden in Breite und Tiefe je 150 mm sowie in der Höhe 400 mm festgelegt. Eine Montage sowie weiterführende Verwendung ist dadurch sowohl an den meisten Portal oder Kragarmführungsmaschinen, als auch in robotergeführten Anwendungen möglich.

### *Masse*

Analog zu den Dimensionen muss die Masse des Schaltventils ebenfalls gängige und für die Führungsmaschinen auslegungsgerechte Grenzen einhalten. Es wird eine maximal zulässige Masse von 10 kg festgelegt. Es gilt darüber hinaus die Prämisse in Hinblick auf Anlagendimensionierung und -dynamik eine möglichst geringe Masse anzustreben.

### *Mechanik/Kinematik*

In dieser Anforderungskategorie sind die grundlegenden Funktionsprinzipien und für die Leistungsfähigkeit des Ventils ausschlaggebende Daten festgelegt. Diese Anforderungen bestimmen somit maßgeblich die Funktionsweise und Prozesssicherheit des Schaltventils. Um prozesssicher bei den in der Wasserhochdrucktechnologie üblichen Drücke den Schneidstrom unterbrechen zu können, ist eine metallische Dichtung notwendig. Die Realisierung der schaltbaren, metallischen Dichtung erfolgt durch die Ausführung als Nadelventil mit einer metallischen Ventalnadel und einem metallischen Ventilsitz. Die Schalt- und damit auch die Spülzeit soll maximal 2 Sekunden betragen und damit mit Ventilen für das Injektorstrahlschneiden konkurrieren. Trotz des komplexeren Schaltvorgangs soll für den Anwender kein Unterschied spürbar sein.

### *Beanspruchungen*

Neben der obligatorischen Druckbeständigkeit ist für die Werkstoffauswahl insbesondere die Korrosionsbeständigkeit gegen wässrige Medien zu berücksichtigen.

### *Kräfte/Drücke*

Die Ventilbaugruppe wird für einen Betriebsdruck von maximal 45 MPa ausgelegt. Dieser ermöglicht beim WASS das Trennen von gängigen Werkstoffen (Aluminiumlegierungen, Baustähle, rostfreie Edelstähle etc.) bis zu einer Materialstärke von ca. 30 mm. 45 MPa Anlagen sind sowohl stationär, als auch mobil einsetzbar, wodurch eine Erprobung der Ventilfunktion in beiden Umgebungen möglich ist.

### *Antriebe*

Der Antrieb der Ventalnadel soll pneumatisch erfolgen. Die pneumatische Betätigung von Schaltventilen in der Wasserhochdrucktechnologie ist industrieller Standard und erfordert daher keine Adaptionen der Führungsmaschine. Da ein kontrollierter Hub in beide Richtungen erforderlich ist, wird ein doppeltwirkender Pneumatikzylinder für den Antrieb des Ventils eingesetzt.

### *Anschlüsse*

Am Schaltventil werden insgesamt vier Anschlüsse vorgesehen. Davon werden zwei für die Druckluftzufuhr, jeweils für den Aufwärts- und den Abwärtshub der Ventilmadel verwendet. Ein weiterer Medienanschluss ist für die Zuführung der Schneidsuspension erforderlich. Der vierte Medienanschluss liefert den Spülstrom, der für das Ventilschalten notwendig ist.

### *Steuerung*

Die Programmierung und Steuerung erfolgt elektronisch durch Speicherprogrammierbare Steuerungen vom Typ Siemens LOGO!. Die Bedienung erfolgt für die Erprobung mittels an der Steuerung angebrachten Funktionstasten. Im kommerziellen Betrieb kann eine Integration in die Anlagensteuerung erfolgen. Durch die weite industrielle Verbreitung von Siemens Steuerungen ist das durch geringen Programmier- oder Nachschulungsaufwand möglich.

### *Nutzung*

Die Nutzung des Ventils zum verschleißarmen Schalten von Suspensionen kann mit der angestrebten Anlagenintegration sowohl stationär, als auch mobil erfolgen. Im Rahmen dieses Vorhabens und hinsichtlich des Gesamtziels, die WASS Technik für die fertigungstechnische Anwendung zu qualifizieren, erfolgt die Nutzung jedoch ausschließlich stationär.

### *Werkstoffe*

Das Schaltventil wird überwiegend aus korrosionsbeständigem Edelstahl gefertigt. Überwiegend eingesetzt wird der Werkstoff 1.4571, welcher neben hinreichender Festigkeit insbesondere eine hohe Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion gewährleistet.

### *Fertigung Montage*

Fertigung und Montage erfolgen in der institutseigenen Werkstatt.

### *Instandhaltung*

Für einen dauerhaften Betrieb und eine einfache und wirtschaftliche Instandhaltung wird das Ventil gemäß seinem zentralen Funktionsprinzip für einen verschleißarmen Betrieb ausgelegt. Es sollen hohe Standzeiten und damit lange Wartungsintervalle einzelner Komponenten realisiert werden. Verschleißteile sollen leicht zugänglich und austauschbar sein.

### *Funktionsüberprüfung*

Nach der Fertigung des Schaltventils erfolgt eine experimentelle Erprobung der Ventulfunktion.

### AP 2: Literaturrecherche zu Standardisierung und Normung

In der Wasserhochdrucktechnik werden unterschiedliche, standardisierte Bauteile eingesetzt. Die Standardisierung fußt dabei meist nicht auf Normung. Es haben sich stattdessen einige, zum Teil herstellereigenspezifische, Bauteile auf dem Markt und in der Verwendung etabliert, welche als Standardbauteile verwendet werden [1,2].

Potentiell anwendbare Normen zu Rohrverschraubungen, welche zum Teil auch als Hochdruckverschraubungen bezeichnet werden, entstammen meist dem Anwendungsbereich der Ölhydraulik und weisen Berstdrücke von wenigen hundert bar auf. Beispielsweise sind Schneidringverschraubungen bis zu einem maximalen Betriebsdruck von 630 bar zu beaufschlagen [3]. Damit sind sie in der Wasserhochdrucktechnologie nicht breit einsetzbar. Normativ behandelt werden zudem zum Teil auch Rohrleitungen für andere Medien, wie z. B. Gase [4]. Die entsprechenden Normen, wie z. B. ISO 8434-1 („Metallische Rohrverschraubungen für Fluidtechnik und allgemeine Anwendung“), DIN 3387 („Lösbare Rohrverbindungen für metallene Gasleitungen“) oder Z sind damit nicht anwendbar.

Sicherheitsanforderungen hinsichtlich statischer Druckfestigkeit, Zyklfestigkeit sowie Dichtheit nach DIN EN 1829 [5] und DIN EN 12162 [6] sind grundsätzlich bei allen Komponenten auf die die jeweilige Norm zutrifft einzuhalten. Zudem gilt für drucktragende Teile die Druckgeräterichtlinie 2014/68/EU [7].

Für die Verbindung von hochdruckführenden Teilen werden in der Wasserhochdrucktechnik sog. HP- (*engl. high-pressure*) bzw. HD- (Hochdruck) Verschraubungen eingesetzt. Diese sind nicht normativ behandelt, es haben sich jedoch Standardgrößen auf dem Markt etabliert. In der Wasserhochdrucktechnologie werden Dichtungsaufgaben meist durch metallische Werkstoffpaarungen realisiert. Die benötigte axiale Dichtkraft wird durch eine Gewindeverbindung aufgebracht (vgl. Abbildung 6).

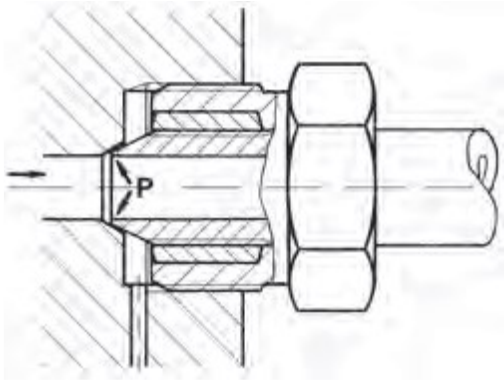


Abbildung 6: SITEC HP-Verschraubung bestehend aus Hochdruckrohr, Druckring und Druckschraube [2]

Der Druckring ist auf ein am Hochdruckrohr aufgebrachtes Gewinde montiert. Der Gewindedurchmesser entspricht dem Rohrdurchmesser und beträgt üblicherweise 1/4“ oder 3/8“. Das Gewinde ist in der Regel als UNF Feingewinde ausgeführt. Es handelt sich dabei zudem um ein Linksgewinde. Der Druckring stellt den Formschluss zwischen Hochdruckrohr und Druckschraube her. Die Druckschraube umhüllt den Druckring und ist mit einem Rechtsgewinde ausgestattet. Dieses kann metrisch oder zöllig ausgeführt sein und stellt das maßgebliche Anschlussgewinde an das zu verbindende Teil dar. Beim Anzug der Gewindeverbindung wird durch Kraftschluss ein Teil auf den innenliegenden Druckring aufgebracht. Die Kombination aus Links- und Rechtsgewinde verhindert ein unerwünschtes Lösen des Druckrings. Um die erforderliche axiale Dichtkraft aufzubringen ist je nach Rohrdurchmesser ein entsprechendes Anzugsmoment erforderlich. Der Rohrdurchmesser bestimmt den Umfang des Kontakts der beiden Dichtkörper. Je größer der Dichtumfang, desto größer das erforderliche Anzugsmoment. Ein zu hohes Anzugsmoment ist zu vermeiden, um unzulässiges Materialfließen auszuschließen. Anzugsmomente typischer HP-Verschraubungen sind in Abbildung 7 dargestellt.

HP-Verschraubung HP connection Raccordement HP			DN $\varnothing$ Orif. Pass.	Körperanschluss Body opening Racc. de corps			Artikel-Nummer Part Number Référence				SITEC-HP-Rohr SITEC HP tubing Tube HP SITEC					Drehm. Torque Couple	
für Rohr inch	for tubing tube mm	pour tube mm	d mm	F	H	E	Druckschr. Nut Vis de serr.	Druckring Collar Bague	Stopfen Plug Bouchon	HEX mm	G links/left/ gauche	i mm	K mm	C mm	(20°) max. bar	Md Nm	
11/16	HP	17.5	12	M30x2.0	16	19	720.0010	720.0020	720.0030	32	M18x1.5	LH	12	13.5	21	1200	120
9/16	HP	14.3	8	M26x1.5	11	15	720.0110	720.0120	720.0130	27	9/16"-18 UNF	LH	8	8.8	19	2400	100
			5/8										6.4	8.4	20	3000	140
			5										4.8	6.0	21.5	6000	160
3/8	HP	9.52	5	M20x1.5	7	12	720.0210	720.0220	720.0232	22	3/8"-24 UNF	LH	5.2	6.0	15	2400	40
			3						720.0230				3.2	4.0	17	7000	70
			1.6						720.0217				720.0227	720.0237	1.6	2.5	18.5
1/4	HP	6.35	3	M16x1.5	5	11	720.0310	720.0320	720.0330	17	1/4"-28 UNF	LH	2.4	3.4	12.5	4000	30
			1.6						720.0332				1.6	2.5	13	8600	40
1/8	HP	3.20	1.0	M16x1.5	3	11	720.0310	720.0322	720.0332	17	5-40 UNC	LH	1.0	1.8	7.5	4000	10
18 mm	HP	18.0	12	M30x2.0	16	19	720.0010	720.0020	720.0030	32	M18x1.5	LH	12	13.5	21	2400	120
14 mm	HP	14.0	8	M26x1.5	11	15	720.0110	720.0420	720.0430	27	M14x1.5	LH	8	8.8	19	2400	100
			5										5	6.0	21.5	6000	160
10 mm	HP	10.0	3	M20x1.5	7	12	720.0210	720.0520	720.0530	22	M10x1	LH	3.6	4.5	16.5	7000	60
6 mm	HP	6.0	3	M16x1.5	5	11	720.0310	720.0620	720.0630	17	M6	LH	2.2	3.4	12.5	4000	35

Abbildung 7: Anschlussmaße typischer HP-Verschraubungen mit Anzugsmomenten [2]

Aus der Übersicht ergibt sich die Eignung von HP-Verschraubungen bis zu einem Druck von 11.000 bar. Sie sind daher in der Hochdrucktechnologie weit verbreitet. Die Montage ist mit mittlerem Aufwand verbunden. Zudem verfügt die Verbindung mittels HP-Verschraubung nahezu keine Flexibilität. Eingesetzt werden sie daher zumeist in Verbindung mit fester Hochdruckverrohrung. Für mobile Anwendungen und damit für die WASS Technologie kommen häufig flexible Hochdruckschläuche zum Einsatz, da diese Vorteile für Transport und die Handhabung vor Ort bieten.

Hochdruckschläuche können ebenfalls mit HP-Verschraubungen ausgestattet werden, welche durch eine Crimpverbindung am Schlauch befestigt werden. Eine gesonderte Betrachtung der Schlauchverbindung ist nicht notwendig, da die Anschlussmaße denen der Festverrohrung entsprechen.

### AP 3: Untersuchung des Pumpennachlaufs und der Drucküberhöhung

Zum WASS eignet sich aufgrund ihrer kompakten Baugröße und hohen Wirkungsgrades bei gleichzeitig hohem Wasservolumenstrom der Einsatz von Plungerpumpen. Diese verfügen im stationären Einsatz über einen elektrischen Antrieb, welcher eine Kurbelwelle antreibt. Auf dieser Kurbelwelle sind meist drei Pleuel mit jeweils einem Plunger montiert. Durch die Übersetzung der Kurbelwellenrotation in oszillierende Bewegungen sorgen die Plunger für das Ansaugen und Verdichten des Wassers. Aufgrund der Massenträgheit des gesamten Pumpensystems kommen die beweglichen Teile der Pumpe nach dem Ausschalten des Antriebs nicht unmittelbar zum Stillstand.

Es wird entsprechend noch für einen kurzen Moment weiteres Wasser gefördert. Dadurch kann es beim Schließen eines Ventils zu einer unerwünschten Druckerhöhung im System kommen. Diese kann im Extremfall zum Überschreiten der Auslegungsgrenzen und damit zu einer Zerstörung des Systems führen. Neben der Funktionsfähigkeit des WASS Systems kann so auch die Arbeitssicherheit in der unmittelbaren Umgebung der Anlage beeinträchtigt werden. Eine unzulässige Drucküberhöhung ist entsprechend zwingend zu vermeiden. Für eine spätere Kompensation durch die Abstimmung von Ventilschließen und Pumpensteuerung wurde zunächst ohne Kompensation auftretende Druckerhöhung ermittelt.

Zur Ermittlung der entstehenden Drucküberhöhung beim zeitgleichen Schließen eines Schaltventils und ausschalten der medienfördernden Plungerpumpe wird ein WASS System mit Reinwasser in Kombination mit einem standardmäßig für das RWS oder WAIS verwendeten Ventil eingesetzt. Für die Medienverbindung zwischen Pumpe und Schaltventil wird eine 10 m lange Schlauchleitung mit einem Innendurchmesser von 6 mm verwendet. Aufgrund des Schwingverhaltens bei stoßartiger Anregung kann die sich einstellende Drucküberhöhung bei plötzlichem Schalten des Ventils abhängig von der Rohrlänge und des Rohrinneendurchmessers abweichen. Je nach Anlagenkonfiguration kann daher eine geringfügige Anpassung des Schaltvorgangs notwendig sein. Die Kompensation kann über zwei Parameter realisiert werden: Einen adaptierbaren Zeitversatz zwischen Ventilschließen und dem Ausschalten der direkt angetriebenen Pumpe oder der Justierung von Druck und Gegendruck der pneumatischen Ventilbetätigung und damit der Anpassung der Geschwindigkeit des Ventilhubes.

In der vorliegenden Konfiguration wird bei einem gleichzeitigen Schalten von Ventil und Pumpe eine Drucküberhöhung von bis zu 10 MPa zu verzeichnen ist. Diese ist durch die vergleichsweise geringe Massenträgheit des Schaltventils im Vergleich zur Plungerpumpe bedingt. Das Ventilschließen wird somit in dem Bruchteil einer Sekunde realisiert, während die Pumpe noch eine längere Zeit nachläuft. Zur Vermeidung werden Ventilschließen und Pumpe zunächst durch einen zeitlichen Versatz angesteuert. Das Ventilschließen erfolgt durch das Betätigen der Taste „Schneidunterbrechung“. Beim Betätigen wird zunächst zum Zeitpunkt  $t = 0$  die Pumpe gestoppt. Das Ventilschließen erfolgt zum Zeitpunkt  $t = 1.500$  ms, also 1,5 s nach dem Stoppen der Pumpe. Dadurch ist im Hochdrucksystem zu Beginn des Schaltvorgangs eine Druckabsenkung um ca. 5 MPa messbar. Beim Ventilschließen wird diese kompensiert und es stellt sich eine

Drucküberhöhung von 2 MPa ein. Das entspricht der Zielvorgabe einer Drucküberhöhung, die geringer als 3 MPa ausfallen muss. Weitere technische Maßnahmen sind für die Vermeidung einer unzulässigen Druckerhöhung daher nicht zu treffen.

#### AP 4: Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Dichtflächenspülung

Für die Realisierung eines Ventilschließens ist die Gewährleistung der Partikelfreiheit der Dichtflächen zwingend notwendig. Da diese verfahrensbedingt stets in Form der Schneidsuspension die Dichtflächen umspülen und ein Dichten damit verhindern, erfolgt die Spülung der Dichtflächen unmittelbar vor dem Ventilschließen. Entsprechend ist neben dem Schneidstrom noch ein Spülstrom ohne Partikel notwendig, welcher die Schneidsuspension von den Dichtflächen verdrängt und diese so spült. Für die Verdrängung ist es notwendig, dass der Spülstrom über einen höheren Druck, als der Schneidstrom verfügt. Durch das zuvor bereits beschriebene Prinzip der Entnahme des Spülstroms aus dem Hochdruckteil des Systems kann dies realisiert werden. Durch die Entnahme unmittelbar nach dem Pumpenauslass und die direkte Führung zum Schneidkopf, verfügt der Spülstrom über keine gebundenen Partikel sowie über einen physikalisch bedingt höheren Druck, als der Schneidstrom. Die Druckdifferenz begründet sich durch die Strömungsverluste des Schneidstroms beim Durchströmen des Druckbehälters und der insgesamt längeren Rohrleitungen. Je nach Anlagenkonfiguration kann die Druckdifferenz vom im Rahmen dieses Vorhabens verwendeten Auslegungspunktes abweichen und dadurch eine Anpassung des Spülvorgangs notwendig sein. Durch das Spülprinzip selbst ist diese notwendige Druckdifferenz aber unabhängig von Betriebsdruck, Anlagenkonfiguration oder den verwendeten Peripheriekomponenten stets gewährleistet.

Die prozessintegrierte Spülung ermöglicht es, die Ventulfunktion ohne zusätzlichen Energieeintrag durch Pumpen oder Abhängigkeit vom Leitungsdruck zu realisieren. Lediglich für das Umschalten zwischen Schneidbetrieb und Schneidunterbrechung bzw. die Zuschaltung des Spülstroms ist zusätzliche Mechanik notwendig. Diese soll zugunsten einer einfachen Bedienbarkeit und flexibler Einsetzbarkeit vollständig in das Schneidventil integriert werden. Die Spülmechanik lässt sich auf unterschiedliche Art und Weise realisieren. Nachfolgend sind einige Konstruktionsvarianten dargestellt und deren Vor- und Nachteile erläutert.

#### Ventilkonzept 1: Zwei Ventilmadeln mit je einem dedizierten Aktuator

Zur Realisierung der Strahlunterbrechung sowie dem Zu- und Abschalten des Spülstroms wird je eine Ventalnadel verwendet. Schematisch ist das Ventilkonzept in Abbildung 8 dargestellt. Diese verfügen über je einen Antrieb, sodass sie unabhängig voneinander schaltbar sind. Das Ventilkonzept ist in Abbildung 8 dargestellt. Im Schneidbetrieb (1) ist die Ventalnadel für das Schalten des Schneidstroms (c1) geöffnet (obere Position). Der Schneidstrom (a) umströmt die Ventalnadel und strömt über den Schneidstromauslass (d) aus dem Ventilkörper aus. Die zweite Ventalnadel zum Schalten des Spülstroms (c2) ist während des Schneidbetriebs in ihrer unteren Ruheposition und sperrt so durch den Kontakt mit dem Ventilsitz den Spül- gegen Schneidstrom ab. Während des Spülvorgangs (2) wird die Ventalnadeln c2 nun angehoben (geöffnet) und gibt so den Spülstrom frei. Durch seinen höheren Druck verdrängt dieser die Schneidsuspension aus dem Ventilkörper und tritt während des Spülvorgangs aus dem Ventilkörper aus. Die Spülzeit muss so bemessen sein, dass die Ventilspindel c1 und deren Ventilsitz vollständig frei von der zuvor verwendeten Schneidsuspension sind. Dadurch, dass während des Spülvorgangs lediglich noch Reinwasser als Medium aus dem Ventilkörper austritt ist trotz des Medienaustritts in aller Regel kein weiterer Schneidbetrieb möglich. Die Führungsmaschine muss sich entsprechend zu Beginn der Strahlunterbrechung in Ruheposition befinden. Nach hinreichender Spülzeit, wenn also der Ventilsitz der Ventalnadel c1 vollständig von Reinwasser (blau) umgeben ist, kann ein Schließen der Ventalnadel c1 erfolgen. Dadurch wird die Auslassöffnung aus dem Ventilkörper vollständig unterbrochen und es liegt der Betriebszustand der Schneidunterbrechung (3) vor.

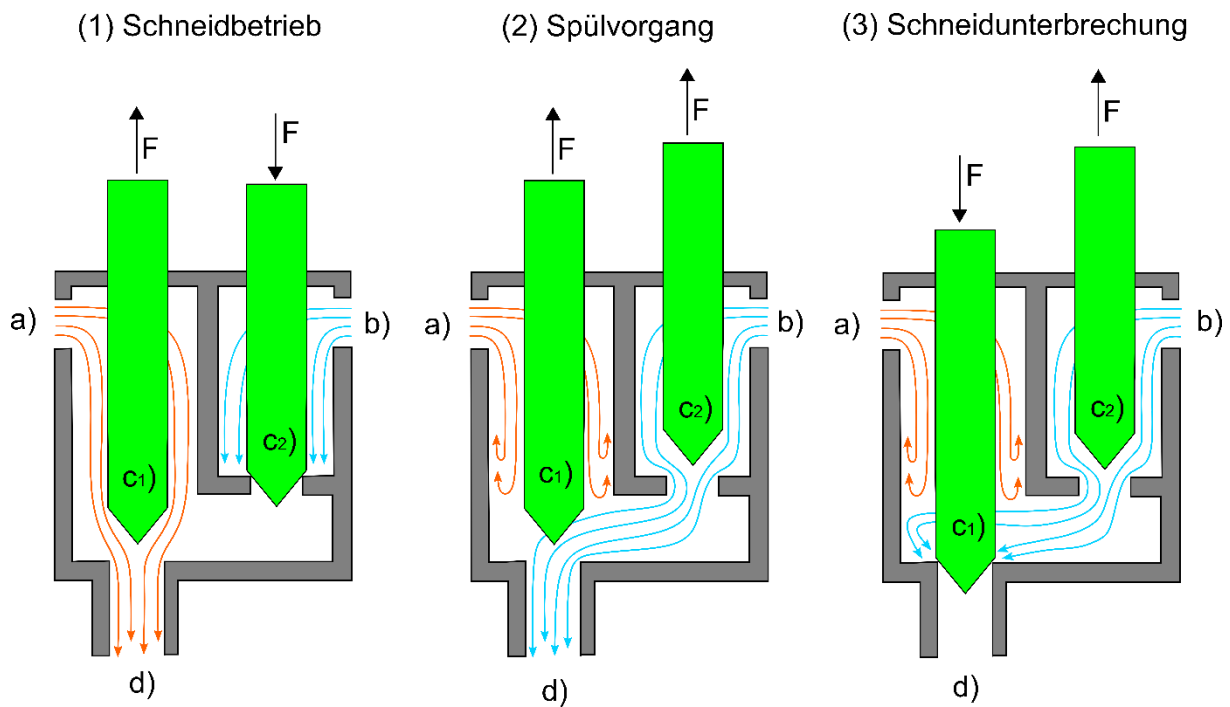


Abbildung 8: Ventilkonzept mit zwei dediziert aktuierten Ventilmadeln. a) Schneidstromeinlass, b) Spülstrom, c1) Ventilmadel für Schneidunterbrechung, c2) Ventilmadel für Spülstromschaltung, d) Schneidstromauslass

Dieses Ventilkonzept verfügt über einige konzeptspezifische Vor- und Nachteile. Zentraler Vorteil dieses Konzepts ist die unabhängige Ansteuerung der beiden Ventilmadeln. Diese kann durch einen pneumatischen, hydraulischen oder elektromechanischen Antrieb erfolgen und ermöglicht eine individuelle und präzise Einstellung von Spül- und Schaltzeiten. Diese Konstruktionsvariante ist entsprechend vorteilhaft in Hinblick auf die Ventilfunktionalität. Aus der Konstruktion ergeben sich jedoch ungünstige Strömungsverhältnisse. Durch den Versatz der beiden Ventilmadeln besteht ein Risiko der Entstehung von Strömungstotgebieten, in denen sich Abrasivreste ansammeln und die Funktion so negativ beeinträchtigen können.

### Ventilkonzept 2: Einfacher Drehschieber

Das auf einem einfachen Drehschieber basierende Ventilkonzept reduziert die Anzahl beweglicher Teile und reduziert durch die rotationssymmetrische Gestaltung Strömungstoträume (vgl. Abbildung 9). Die für ein Ventilschließen notwendige Dichtung wird über einen dauerhaft bestehenden Gleitkontakt zwischen Drehschieber und Ventilgehäuse realisiert. Zwischen den unterschiedlichen Betriebsmodi kann durch die Rotation des Schiebers gewechselt werden. Dabei ist kein Lösen der Dichtflächen voneinander notwendig. Durch die Rotation wird die Dichtfläche lokal verlagert und erfüllt

eine jeweils andere Funktion. Im Schneidbetrieb (1) verschließt der Schieber den Zu-  
 lauf des Spülstroms (b) und ermöglicht so der Schneidsuspension (a) das Passieren  
 des Ventilgehäuses sowie den Austritt aus der Düse. Für die Schneidunterbrechung  
 wird der Schieber im Uhrzeigersinn rotiert (2) und gibt dabei den Spülstrom frei. Durch  
 den höheren Druck des Spülstroms wird die Schneidsuspension aus dem Ventilge-  
 häuse verdrängt. Während des Schaltvorgangs tritt das Reinwasser des Spülstroms  
 aus der Düse aus. Zur Herstellung des Betriebszustandes der Schneidunterbrechung  
 wird der Schieber abschließend in die untere Ruheposition rotiert und verschließt dabei  
 den Auslass aus dem Ventilgehäuse (d).

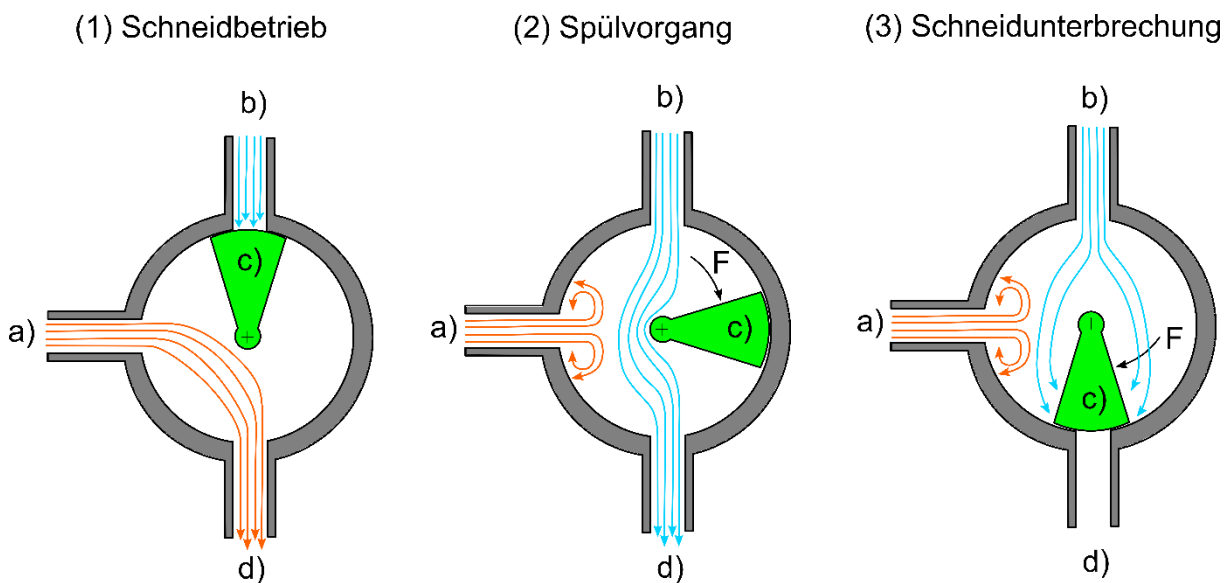


Abbildung 9: Ventilkonzept mit einfachem Drehschieber. a) Schneidstromeinlass, b) Spülstrom, c) Drehschieber, d) Schneidstromauslass

Konstruktive Vorteile bestehen durch die geringe Anzahl beweglicher Teile. Lediglich der Drehschieber ist drehbar gelagert und muss mit einem Antrieb ausgestattet werden. Die Rotation ist zudem mit einem elektrischen Antrieb geringer Baugröße realisierbar. Nachteilig stellt sich jedoch die Dichtung zwischen Drehschieber und Ventilgehäuse dar. Sie muss neben Dicht- auch über Gleiteigenschaften verfügen. Entsprechend besteht bei der Auswahl der Werkstoffpaarung ein Zielkonflikt zwischen diesen beiden Anforderungen. Denkbar ist die Verwendung von Gleitlagerwerkstoffen, die z. B. auf Kupferlegierungen bestehen. Hierbei besteht jedoch das Risiko, dass kleine Abrasivpartikel beim Gleiten zwischen den Dichtflächen für abrasiven Dreikörperverschleiß sorgen. Es ist damit von einer geringen Standzeit der Ventilkomponenten auszugehen. Zusätzlich ist durch die im Vergleich zu Edelstählen geringe Festigkeit der Kupferlegierungen von einer Begrenzung der Skalierbarkeit auf hohe Betriebsdrücke

auszugehen. Durch die für das Dichten notwendige Flächenpressung wirkt zusätzlich eine hohe radiale Last auf die Antriebswelle des Drehschiebers welche Erhöhte Anforderungen an die konstruktive Auslegung sowie die Baugröße des Ventils stellt.

### Ventilkonzept 3: Doppeltwirkende Ventalnadel mit einem Aktuator

Als drittes Ventilkonzept ist in Abbildung 10 ein Ventil mit einer einzigen, doppeltwirkenden Ventalnadel abgebildet. Die Ventalnadel verfügt über zwei Funktionsflächen die als konische Dichtflächen ausgeführt sind. Eine davon befindet sich auf der Ober- und eine auf der Unterseite der Ventalnadel. Die Ventilspindel wird über einen Linearantrieb angetrieben. Dieser kann grundsätzlich elektromechanisch, hydraulisch oder pneumatisch ausgeführt werden. Der Ventilhub dient der Umschaltung zwischen den beiden Betriebszuständen Schneidbetrieb (1) und Schneidunterbrechung (3). Während des Hubes wird der Spülvorgang (2) realisiert. Im Schneidbetrieb ist die Ventilspindel auf Zug belastet und befindet sich in der oberen Ruhestellung. Die obere konische Dichtfläche der Ventalnadel dichtet den Spülstrom (b) am oberen Ventilsitz ab. Der Schneidstrom (b) umströmt die Ventalnadel und tritt am Schneidstromauslass (d) aus dem Ventilkörper aus. Während des Spülvorgangs wird die Ventilspindel abgesenkt. Dabei umströmt der Spülstrom die Ventalnadel und verdrängt durch seinen höheren Druck die Schneidsuspension aus dem Ventilkörper. Sobald die Ventalnadel sowie der untere Ventilsitz vollständig vom Spülstrom umspült sind, erfolgt ein Ventilschließen durch die Absenkung der Ventalnadel auf den unteren Ventilsitz sowie das Aufbringen der benötigten Dichtkraft.

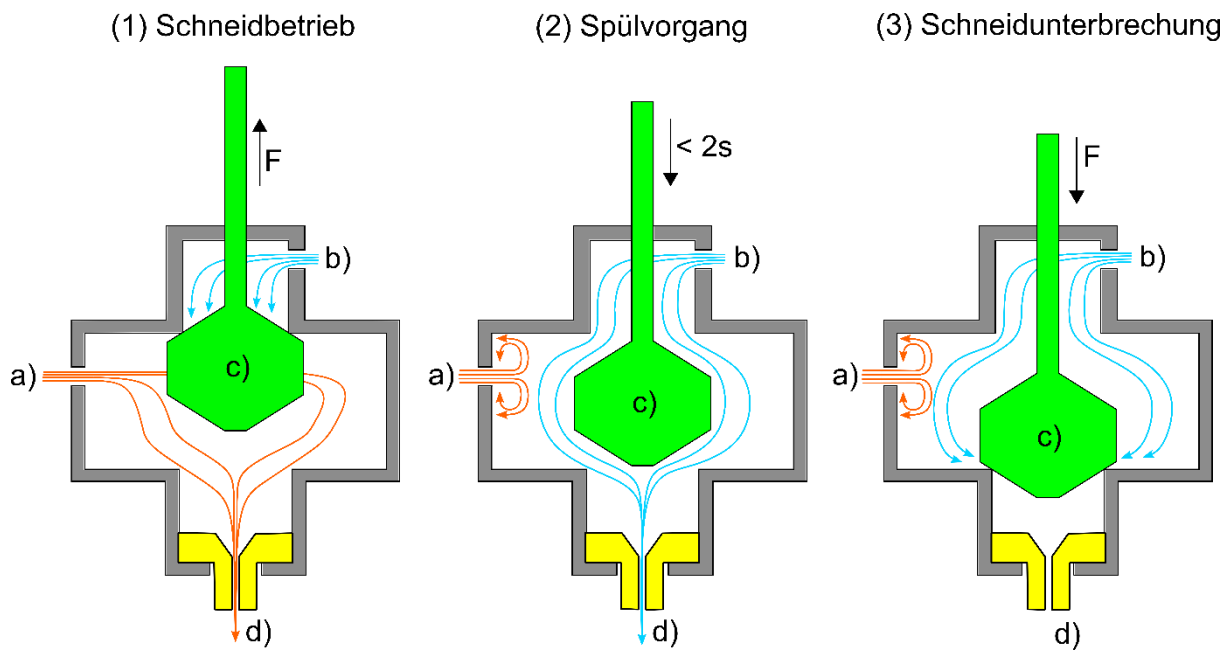


Abbildung 10: Ventilkonzept mit einer einzigen, doppelwirkenden Ventilschleife. a) Schneidstromeinlass, b) Spülstrom, c) Drehschieber, d) Schneidstromauslass

Das beschriebene Ventilkonzept vereint die Vorteile einer geringen Anzahl beweglicher Teile mit einem prozesssicheren Dichtmechanismus. Das Ventilschließen selbst wird durch das bereits etablierte Prinzip des rein translatorischen Ventilhubes mit konischen, metallischen Dichtflächen umgesetzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Ventilprinzip für die Anwendung hoher Schneiddrücke skaliert werden kann. Es sind keine Gleit- oder Dichtwerkstoffe mit geringen Festigkeiten notwendig, was sich positiv auf die zu erwartende Standzeit der Komponenten auswirkt.

Die Beurteilung der einzelnen Konstruktionsvarianten mit Hilfe einer Nutzwertanalyse ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Kriterien aus dem Lastenheft sind dabei einer normierten Gewichtung unterzogen. Die Bewertung jedes Kriteriums erfolgt anhand einer Punkteskala von 1 (schlecht) bis 10 (ausgezeichnet). Die jeweiligen Punkte werden für jedes Ventilkonzept summiert und ergeben so eine Gesamtpunktzahl. Je höher diese Gesamtpunktzahl liegt, desto besser ist die jeweilige Konstruktionsvariante bewertet.

Tabelle 2: Nutzwertanalyse der unterschiedlichen Ventilkonzepte

Kriterium	Gewichtung	Konstruktionsvarianten					
		Ventilkonzept 1		Ventilkonzept 2		Ventilkonzept 3	
Geometrie	0,1	2	0,2	8	0,8	8	0,8

Masse	0,05	2	0,1	10	0,5	7	0,35
Mechanik/Kinematik	0,2	10	2	4	0,8	8	1,6
Kräfte/Drücke	0,2	6	1,2	10	2	8	1,6
Antriebe	0,1	1	0,1	10	1	7	0,7
Steuerung	0,05	10	0,5	5	0,25	5	0,25
Nutzung	0,1	8	0,8	8	0,8	10	1
Montage	0,05	6	0,3	4	0,2	8	0,4
Instandhaltung	0,15	6	0,9	3	0,45	7	1,05
	$\Sigma$ 1	$\Sigma$ 6,1		$\Sigma$ 6,8		$\Sigma$ 7,75	

Es ist ersichtlich, dass das Ventilkonzept über die höchste Gesamtpunktzahl verfügt und damit die vorteilhafteste Konstruktionsvariante darstellt. Dabei verfügt das Ventilkonzept 3 nach wenigen Bewertungskriterien über herausragende Eigenschaften. Dies ist lediglich bei der Nutzung der Fall. Durch die Funktionsweise der einzelnen, doppelwirkenden Nadel kann das Ventil analog zu einem einfachen Nadelventil gleichermaßen verwendet werden. Die internen Funktionsunterschiede erfordern für den Anwender keine zusätzliche Schulung. Maschinenseitig sind die bereits vorhandenen Schalt- und Medienanschlüsse verwendbar und es sind entsprechend ebenfalls keine Adaptionen notwendig. Die meisten Kriterien des Ventilkonzepts sind sehr gut erfüllt und entsprechend mit den Punktzahlen 7-8 bewertet. Befriedigend ist lediglich die Steuerung des Ventils bewertet. Durch die Verwendung einer einzelnen, doppelwirkenden Ventilmadel ist keine dedizierte Ansteuerung der jeweiligen Ventilfunktion möglich. Die Dauer bzw. die Geschwindigkeit von Spül- und Schaltvorgang ist zudem lediglich indirekt über den Gegendruck des pneumatischen Antriebs möglich, da kein Positionierantrieb für die Ventilspindel verwendet wird. In der Gesamtheit überwiegt die Umsetzung der Bewertungskriterien des Ventilkonzepts 3 die der beiden anderen Konzepte.

Auf Basis der vorliegenden Nutzwertanalyse wird daher das Ventilkonzept 3 für die weitere Entwicklung ausgewählt. Die Konstruktions- und Entwicklungsmethodik wird in den nachfolgenden Arbeitspaketen beschrieben.

#### AP 5: CFD-Simulation und Optimierung des Spülvorgangs

Die zentrale Funktion des Schaltventils ist die Spülung der Dichtflächen während des Umschaltens von Schneidbetrieb auf Schneidunterbrechung. Diesem Spülvorgang kommt in der Entwicklung des Ventils hinsichtlich der prozesssicheren Funktionsweise

des Schaltventils daher besondere Bedeutung zu. Er wird daher mit numerischen Methoden abgebildet und simuliert. Dazu wird die Geometrie des Strömungsinnenraums modelliert und in ein Rechennetz umgewandelt. Das Netz besteht aus 26.022 Knoten sowie 119.695 tetragonalen Elementen mit einer minimalen Kantenlänge von 1,57 mm.

Die Erprobung des Schaltventils für Suspensionen erfolgt mit einer mobil einsetzbaren Suspensionsstrahlanlage der Firma ANT AG vom Typ miniMACE. Sie verfügt über einen maximalen Betriebsdruck von 45 MPa. Als Randbedingungen werden entsprechend zwei Medieneinlässe vorgesehen: Schneidsuspension mit einem Druck von 45 MPa sowie Reinwasser als Spülstrom mit einem geringfügig höheren Druck von 45,5 MPa. Ein Medienauslass ist an der Schneiddüse vorgesehen. Das Netz sowie die Randbedingungen der Simulation sind in Abbildung 11 dargestellt.

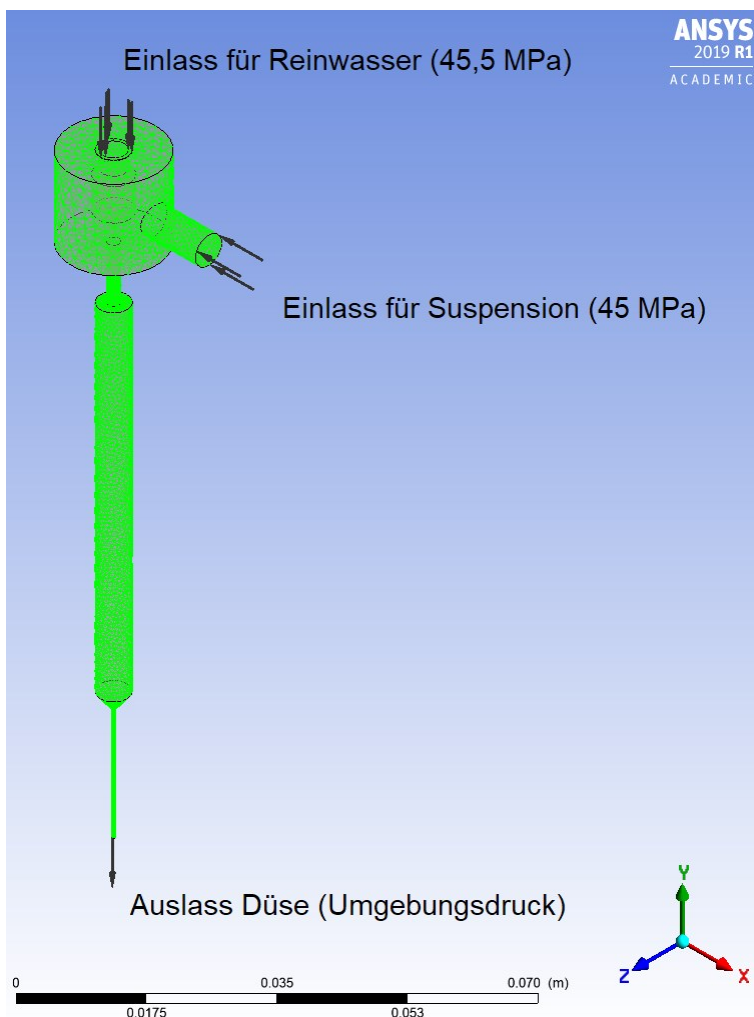


Abbildung 11: Vernetzung und Randbedingungen der CFD-Simulation zur Modellierung des Spülvorgangs beim Schaltvorgang eines Schaltventils zum Schalten von Suspensionen

Die Simulation wird zeitabhängig ausgeführt. Zu Beginn der Simulation ist das gesamte Volumen mit Schneidsuspension gefüllt. Das entspricht dem Zustand des Ventils im Schneidbetrieb. Simuliert wird die Verdrängung der Suspension durch den Reinwasserspülstrom mit höherem Druck. Die Berechnung und Auswertung erfolgt in Zeitinkrementen von 0,25 s. Die Ergebnisse der Simulation sind im Serienbild in Abbildung 12 dargestellt. Der Farbcode zeigt in Rot einen maximalen, volumetrischen Anteil der Suspension von 1 %. Die Farbe Blau entspricht einem volumetrischen Anteil der Schneidsuspension von 0 % und damit in der zweiphasigen Simulation analog einem volumetrischen Reinwasseranteil von 100 %.

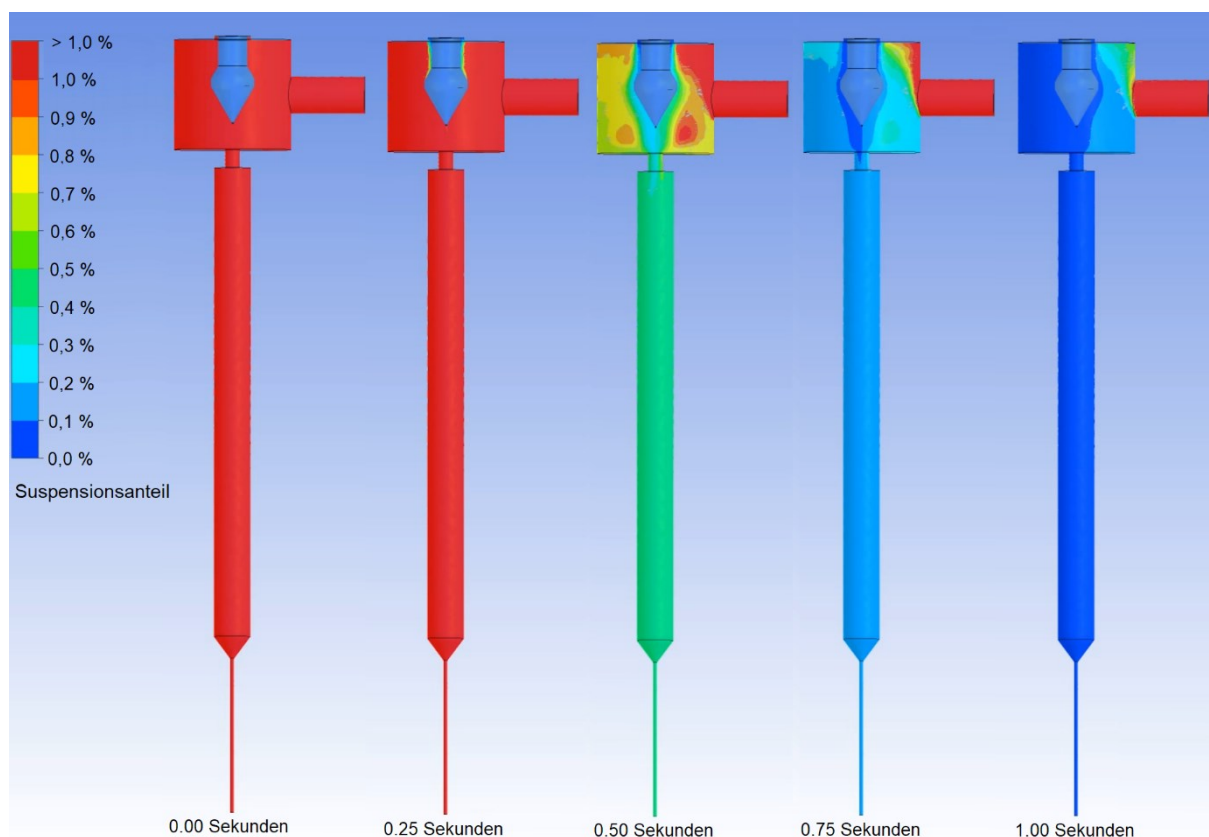


Abbildung 12: Zeitlicher Ablauf der Mischung von Schneid- und Spülstrom beim Schließen des Schaltventils (Absenken der Ventilmadel).

Entsprechend der vorangestellten Erläuterungen ist für das Ventilschließen eine Vollständige Spülung der Dichtflächen am Ventilsitz notwendig. Der volumetrische Suspensionsanteil muss zum Zeitpunkt des Ventilschließens daher 0 % betragen.

Anhand des zeitlichen Ablaufs der CFD-Simulation ist zu erkennen, dass der Anteil der Schneidsuspension im Schneidbetrieb über 1 % liegt. Die Skaleneinteilung ist so vorgenommen, dass oberhalb dieses Wertes nicht mehr differenziert werden kann. Es kann aber von einem Phasenanteil von 100 % Schneidsuspension im Schneidbetrieb

ausgegangen werden. Zu Beginn des Ventilspülens wird die Ventilspindeln nach 250 ms koaxial vom Spülstrom umströmt. Nach 500 ms ist der untere Ventilsitz teilweise umströmt. Es ergibt sich an der Bohrungskante des Ventilsitzes ein volumetrischer Suspensionsanteil von ca. 0,35 %. Dieser Anteil sinkt nach 750 ms auf 0,1 %. Es ist dabei zu erkennen, dass sich in der Mischkammer ein Totraum bildet, in welchem weiterhin ein Suspensionsanteil von mehr als 1 % vorliegt. Dieser befindet sich jedoch nicht im Bereich der Funktionsflächen und beeinträchtigt die Schaltfunktion damit nicht. Nach 1 s kann eine vollständige Spülung des unteren Ventilsitzes festgestellt werden. Der Suspensionsanteil beträgt entsprechend 0 %. Im Totbereich über der Ventalnadel hat der Suspensionsanteil auf ca. 0,6 % angenommen. Es kann also im weiteren Verlauf von einer vollständigen Mischkammerspülung ausgegangen werden. Die Spülung des unteren Ventilsitzes ist nach 1 s vollständig erfolgt und es kann ein Ventilschließen durch die Absenkung der Ventalnadel erfolgen.

#### AP 6: Experimentelle Validierung der Simulation im Labormaßstab

Die experimentelle Validierung der CFD-Simulation erfolgte im Rahmen der Schneidversuche in AP 13 und ist in diesem Kapitel ab Seite 53 erläutert. Das grundlegende Vorgehen umfasst dabei die folgenden Schritte:

1. Fertigung der Ventilbaugruppe
2. Adaption der Pumpensteuerung
3. Inbetriebnahme des Schaltventils und der Pumpensteuerung
4. Durchführung statischer Durchstechversuche
5. Montage an Führungsmaschine
6. Schneidversuche

Die Beurteilung der Ventilfunktion erfolgt indirekt durch das Erzielen einer Schneidwirkung und der Funktionsfähigkeit der Strahlunterbrechungsfunktion.

#### AP 7: Strömungsmechanische Auslegung der Mischkammer

Zur strömungsmechanischen Auslegung der Mischkammer wurde diese im Rahmen dieses Vorhabens in einer CFD-Simulation untersucht. Abbildung 13 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung der Strömung innerhalb der Mischkammer im Schneidbetrieb. Die Farbskala zeigt Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0 m/s (blau) und 15 m/s (rot). Dargestellt sind im linken Bildteil die Strömungslinien und im rechten Bildteil ein Volumenrendering.

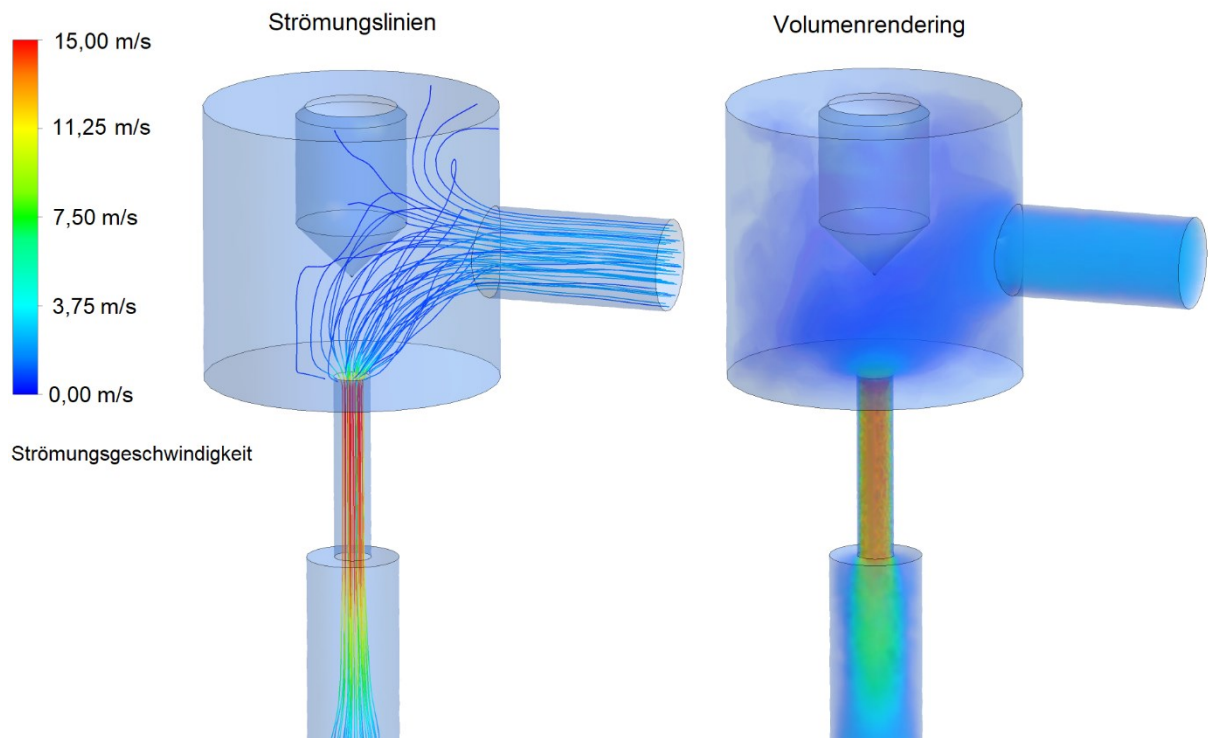


Abbildung 13: Darstellung der Strömungslinien (links) und eines Volumenrenderings (rechts) der CFD-Simulation der Mischkammer des Schaltventils zum Schalten von Suspensionen

Im Bereich des Ventilsitzes ist eine Beschleunigung der Strömung auf etwa 15 m/s zu erkennen. Nach Verlassen des Ventilsitzes stellt sich im darunter befindlichen Kollimationsrohr eine Rohrströmung mit einer Geschwindigkeit von ca. 3 m/s ein. Im Bereich der Mischkammer liegen geringere Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 2,5 m/s vor. Anhand der Stromliniendarstellung ist zu erkennen, dass die Strömung während der Umlenkung um 90° die Ventalnadel umströmt. Die Strömung wird von dieser beeinflusst und teilweise nach oben abgelenkt. Ein Teil der Schneidsuspension trifft entsprechend orthogonal auf die Ventalnadel. Die Oberflächengüte der Ventalnadel ist für eine prozesssichere Schaltfunktion zentral. Durch das orthogonale Auftreffen zur Ventalnadeloberfläche wird Prallverschleiß an dieser durch die in der Suspension enthaltenen Partikel begünstigt. Dieser führt zu einer Oberflächenzerrüttung und damit zu einer Herabsetzung der Ventilstandzeit. Tangential an der Ventalnadeloberfläche entlang strömende Partikel führend zusätzlich zu hydroabrasiven Gleitverschleiß an der Dichtfläche. Gleiches gilt für die Bohrungskanten des Ventilsitzes. Eine Ausführung aus verschleißbeständigen Werkstoffen kann den Verschleiß an den Dichtflächen in Folge der beschriebenen Mechanismen verringern bzw. verlangsamen. Für die Realisierung der Dichtfunktion sowie für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ist jedoch

die Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe, wobei einer eine hohe und der andere eine niedrige Härte aufweist, notwendig.

Durch die unterschiedliche Härte wird beim Kontakt der Dichtflächen das plastische Fließen eines einzelnen Körpers begünstigt, während der andere lediglich im elastischen Bereich belastet wird. Die Werkstückoberflächen passen sich durch das Fließen aneinander an und gewährleisten so das Ventilschließen. Es ist von Vorteil, den weichen Werkstoff in der Konstruktion und Auslegung der Ventilbaugruppe für das Bauteil zu verwenden, welches für eine Wartung bzw. den Austausch besser zugänglich ist. In der Ventilbaugruppe ist das die Ventalnadel, da der Ventilsitz in den Ventilkörper eingepresst ist und daher eine aufwändigere Demontage erfordert. Eine Ventalnadel mit geringer Härte ist jedoch auch anfällig für hydroabrasiven Gleitverschleiß oder Prallverschleiß durch die Partikel der Schneidsuspension. Abhängig von den Ergebnissen der experimentellen Erprobung sind ggf. konstruktive Maßnahmen zur Verringerung des durch die Schneidsuspension bedingten Verschleißes zu treffen, da die Ventilstandzeit ansonsten unzulässig herabgesetzt werden kann.

Eine Konstruktionsvariante zur Verringerung etwaiger Schädigung durch hydroabrasiven Gleitverschleiß oder Oberflächenzerrüttung durch Prallverschleiß an der Ventalnadel ist die Gestaltung des oberen Ventilsitzes mit einer Versenkung der Ventalnadel als Schutz gegen die umströmende Schneidsuspension. Abbildung 14 zeigt die Konstruktionsweise des oberen Ventilsitzes mit einer Abschattung der Ventalnadel während des Schneidbetriebs.

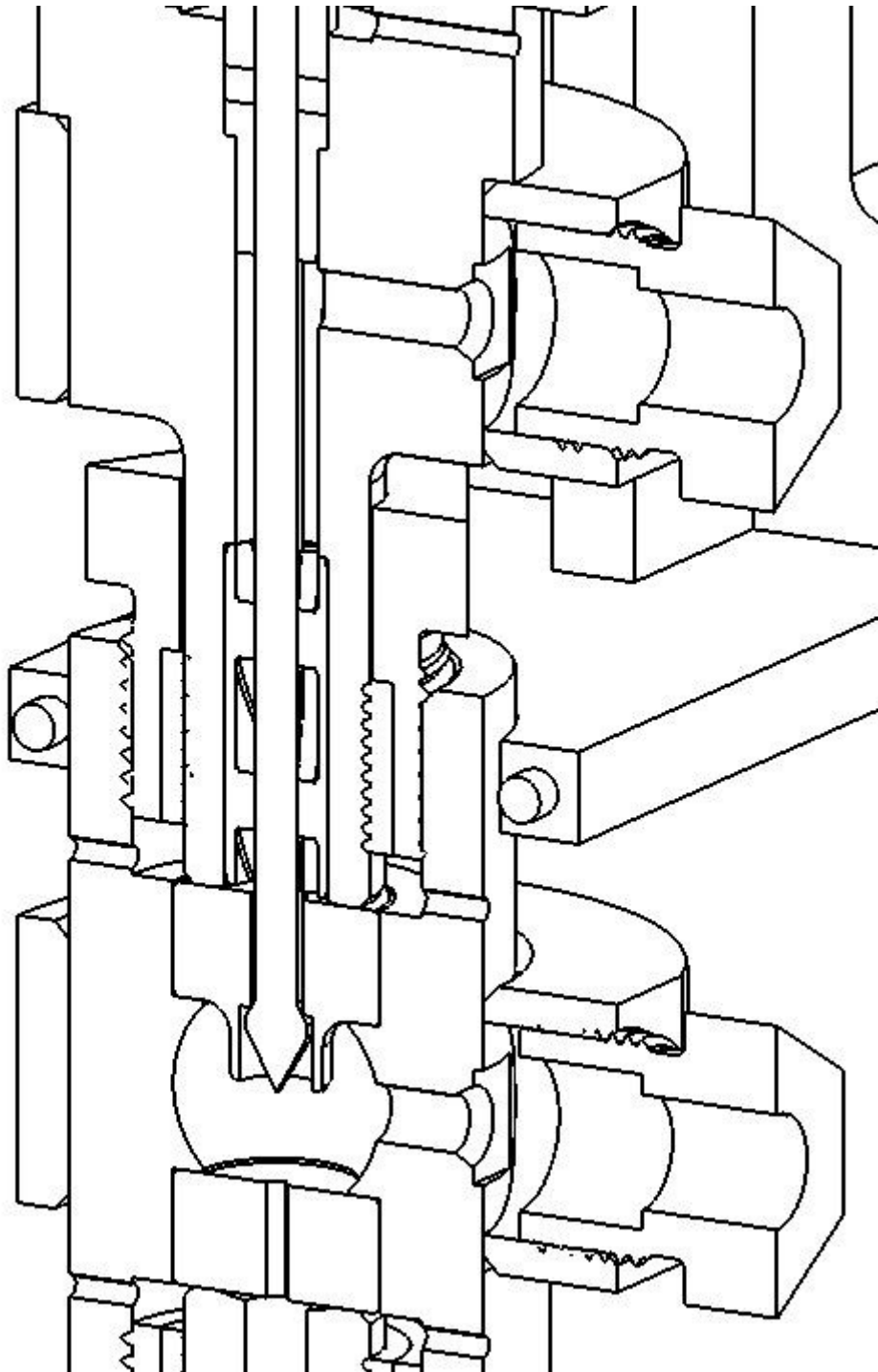


Abbildung 14: Abschattung der Ventilnadel im Schneidbetrieb zur Verringerung des Verschleißes der Funktionsflächen

Da sich die Ventilnadel im Schneidbetrieb in der Ruheposition am oberen Ventilsitz befindet, ist diese durch den zusätzlichen Absatz am Ventilsitz nicht direkt von der Schneidsuspension umströmt. Der hydroabrasive Gleitverschleiß sowie die Oberflächenzerrüttung durch Prallverschleiß treten dann an der Außenseite dieses zusätzlichen Absatzes auf. Der obere Ventilsitz ist bei Ausführung mit zusätzlichem Absatz

zur Versenkung der Ventalnadel ein aufwändiges und damit teures Teil. Ein Austauschintervall soll im Sinne eines wirtschaftlichen Betriebs möglichst lang gestaltet werden. Da die Ventalnadel in Hinblick auf eine dichtende Werkstoffpaarung aus einem weicheren Material ausgeführt wird, kann der Ventilsitz mit hoher Härte und damit verschleißbeständig ausgeführt werden. Der umhüllende Zusatzabsatz erfüllt keine Dichtfunktion, die die Verwendung eines Werkstoffs mit hoher Grundhärte oder eine Aufhärtung des Werkstoffs verhindert. Aufgrund der aufwändigen Konstruktion und den erhöhten Anforderungen an den Werkstoff ist diese Konstruktionsvariante jedoch nur zu wählen, wenn die Abschattung der Ventalnadel aufgrund unzulässig hohen Verschleißes zwingend erforderlich ist. Ergibt sich für die jeweilige Anwendung ohne zusätzliche Abschattung eine hinreichende Ventalnadelstandzeit, ist diese Variante zu bevorzugen. Für die jeweilige Variante müssen keine Anpassungen am Ventilkörper vorgenommen werden. Es ist daher möglich je nach Bedarf, den oberen Ventilsitz an die Erfordernisse zu adaptieren.

#### AP 8: Untersuchung von Werkstoffpaarungen für Ventilschließflächen

Für die Gewährleistung eines verschleißarmen und prozesssicheren Betriebs ist die Auswahl der Werkstoffpaarung von Ventalnadel und Ventilsitz neben der strömungsmechanischen Auslegung der Komponenten maßgeblich verantwortlich.

An die Werkstoffe werden hohe Anforderungen hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit in wässrigen Medien sowie ihrer Verschleißbeständigkeit gestellt. Darüber hinaus eignen sich lediglich duktile Werkstoffe, da für die erforderliche Dichtwirkung ein plastisches Fließen der Werkstoffe notwendig ist. Verwendet werden nach dem Stand der Technik überwiegend die für die Wasserhochdrucktechnologie üblichen korrosionsbeständigen Edelstähle 1.4571 und 1.4404. Sie zeichnen sich durch eine hohe Beständigkeit gegen wässrige Medien, insbesondere gegen Spannungsrisskorrosion aus. Im Rahmen dieses Weiterentwicklungsvorhabens wurden sowohl Ventalnadel, als auch Ventilsitz aus dem Werkstoff 1.4571 gefertigt. Die Bauteile verfügen damit über die gleichen technologischen Eigenschaften, was grundsätzlich für die Realisierung der Dichtfunktion mit einigen Herausforderungen behaftet ist.

Der Kontakt zwischen Ventalnadel und Ventilsitz sorgt für die Trennung von zwei Fluidvolumen und damit der Trennung der jeweiligen Medien. Um das zu gewährleisten, muss ein hinreichender Festkörperkontakt bestehen. Es ist dadurch eine sog. absolute

Dichtheit zu erreichen [8]. Trotz der Relativbewegung der beiden Festkörper Ventildadel und Ventilsitz beim Wechseln des Betriebszustands, liegt im Ruhezustand ein statischer Dichtfall vor. Der notwendige Festkörperkontakt wird durch das lokale Fließen der Edelstähle im Bereich des Kontakts hergestellt. Zu einem geringen Anteil geht auch elastische Verformung in die Kontaktherstellung ein. Verglichen mit Polymerdichtungen ist der elastische Anteil jedoch gering.

Durch das plastische Fließen des Materials an der Dichtfläche, sind diese bei wiederholter Betätigung fortlaufenden Verformungen ausgesetzt. Ein fortschreitender Dichtflächenverschleiß geht damit einher [9]. Nach einer endlichen Anzahl von Schaltvorgängen wird die Dichtfunktion nicht mehr realisiert und ein Austausch der Komponenten ist erforderlich. Die Verwendung von verschleißbeständigen Materialpaarungen ist im breiten kommerziellen Einsatz zu empfehlen. Im Rahmen dieses Vorhabens konnte die Ventildichtung durch die Verwendung der Werkstoffpaarung 1.4571/1.4571 reproduzierbar realisiert werden. Im Rahmen der experimentellen Erprobung werden die Bauteile dabei verglichen mit dem kommerziellen Betrieb lediglich einer geringen Anzahl Schaltzyklen (ca. 100) unterzogen. Eine plastische Verformung ist an den Komponenten feststellbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Austausch nach weniger als 1.000 Schaltvorgängen notwendig ist. Für den kommerziellen Betrieb ist es von Vorteil, die Bauteiloberflächen verschleißbeständiger zu gestalten. Bei gleichzeitiger Beibehaltung der grundlegenden Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit ist dies beispielsweise durch die Veränderung der Oberflächeneigenschaften möglich. Es ist zielführend im Sinne einer einfachen und kostengünstigen Wartung die beiden dichtenden Bauteile so zu gestalten, dass sie über eine unterschiedliche Härte verfügen. Dies wirkt sich vorteilhaft auf die Dichtwirkung aus und ermöglicht es, gezielt zu steuern, welches der Bauteile häufigen Austauschintervallen unterliegt. Entsprechend ist das Bauteil, welches konstruktiv bedingt einfacher auszutauschen und günstiger zu produzieren ist, mit einer geringeren Härte auszulegen. Im Falle des im Rahmen dieses Vorhabens weiterentwickelte Schaltventil handelt es sich dabei um die beiden Ventilsitze. Die Ventildadel ist also entsprechend für die kommerzielle Anwendung einer Oberflächenbehandlung zu unterziehen. Denkbar sind hier beispielsweise das Nitrieren oder das Hartverchromen.

## AP 9: Konstruktion eines Suspensionsschaltventils als einzelnes Bauteil

Das Ventil zum Schalten von Suspensionen soll entsprechend dem in AP 1 ausgearbeiteten Lastenheft als einzelnes Bauteil ausgeführt werden, welches an kommerziell für das Wasserstrahlschneiden eingesetzte Führungsmaschinen montiert werden kann. Dazu sollen die äußeren Abmaße sowie die Medienanschlüsse nach Möglichkeit den beim üblicherweise eingesetzten Injektorstrahlschneiden entsprechen. Aufgrund der Festlegung des Funktionsprinzips durch die beschriebene Nutzwertanalyse ist der zentrale Bestandteil der Ventilkonstruktion die doppelwirkende Ventilnadel. Diese erfordert einen einzigen Antrieb, welcher den Ventilnadelhub bzw. das Absenken ermöglicht. Die Ventilspindel wird je nach Ventilstellung auf Druck oder auf Zug belastet. Somit ist für die Auslegung die differenzierte Betrachtung von zwei Lastfällen erforderlich.

Im Schneidbetrieb befindet sich die Ventilnadel in der oberen Position. Der Dichtkontakt besteht zwischen der oberen konischen Ventilnadelfläche sowie dem oberen Ventilsitz. Der Kontakt ist umlaufend und damit ringförmig. Um ein plastisches Fließen des Materials und damit die Dichtwirkung für im Betrieb auftretende Drücke zu gewährleisten, muss eine Mindestflächenpressung erreicht werden. Die aufzubringende Dichtkraft ist damit abhängig vom Kontaktumfang zwischen Ventilnadel und Ventilsitz. Es ergeben sich die nachfolgend in Tabelle 3 dargestellten, lastfallabhängigen Dichtkräfte.

Tabelle 3: Vom Lastfall abhängige erforderliche Dichtkraft für die Funktion der Ventilnadel

Lastfall	Bezeichnung Dichtkraft	Beanspruchungsart	Dichtkraft
1	$F_{\text{Dichtung},1}$	Zug	3.500 N
2	$F_{\text{Dichtung},2}$	Druck	1.300 N

Die notwendige Dichtkraft wird vom Ventilspindeltrieb als Zugkraft  $F_{\text{Zug}}$  aufgebracht. Entgegen wirken dieser durch den pneumatischen Antrieb aufgebrachten Kraft die Dichtkraft an der Ventilnadel selbst  $F_{\text{Dichtung},1}$  sowie die Reibkraft der Ventilspindeldichtpackung  $F_{\text{R, Packung}}$ . Die Ventilspindeldichtung ist notwendig, um den Austritt von Medien aus dem Ventilgehäuse und den Kontakt mit dem Antrieb zu verhindern. Die entstehende Reibkraft wirkt dem Ventilhub oder dem Ventilabsenken stets entgegen. Um die Reibkraft zu minimieren, ist der Dichtring der Packung aus PTFE gefertigt. Durch die gleichgroßen Reibbeiwerte für Haft- und Gleitreibung ist bei Verwendung von PTFE-

Dichtungen die zusätzliche Berücksichtigung der Haftreibung nicht erforderlich. Die durch die Dichtpackung hervorgerufene Reibkraft auf die Ventilspindel beträgt  $F_{R, Packung} = 60 \text{ N}$  und wirkt dem Ventilspindelhub bzw. der -Absenkung entgegen. Weiterhin treten die Betriebskräfte  $F_{1,1}$  und  $F_{2,1}$  auf, welche durch die unter Druck stehenden Fluide hervorgerufen werden. Neben dem Druckunterschied von Spül- und Schneidstrom unterscheiden sich die durch sie hervorgerufenen Kräfte auch durch die jeweils unterschiedlichen Stirnflächen, auf die der Druck jeweils wirkt (vgl. Abbildung 15). Bei einem Auslegungsbetriebsdruck von 45 MPa betragen diese Kräfte  $F_{1,1} = 906 \text{ N}$  und  $F_{2,1} = 1.622 \text{ N}$ .

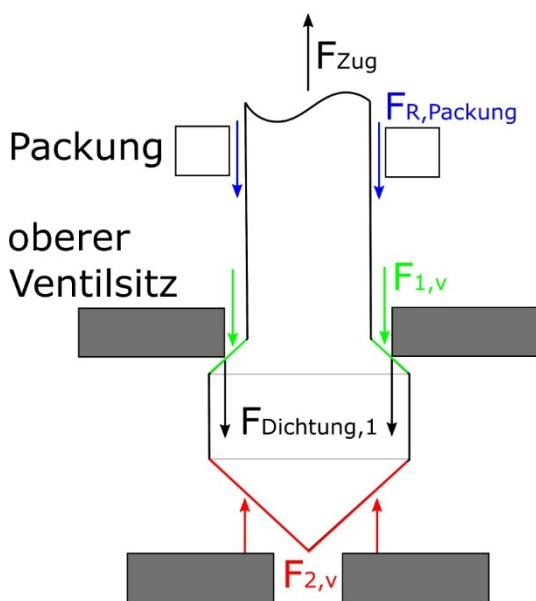


Abbildung 15: Lastfall 1: An der Ventilnadel wirkende Kräfte im Schneidbetrieb

Zur Schneidunterbrechung wird die Ventilnadel abgesenkt und es wird ein Kontakt der Nadel mit dem unteren Ventilsitz hergestellt. Die benötigte Dichtkraft  $F_{Dichtung, 2}$  wird über den pneumatischen Ventilspindeltrieb als Druck auf die Ventilspindel aufgebracht. Die Reibkraft der Dichtpackung  $F_{R, Packung}$  wirkt dem Ventilhub analog zum Lastfall 1 entgegen. Die Betriebskräfte  $F_{1,2}$  und  $F_{2,2}$  unterscheiden sich zu den im Lastfall 1 auftretenden Kräften bei gleichem Betriebsdruck durch die veränderten Stirnflächen und betragen  $F_{1,2} = 906 \text{ N}$  und  $F_{2,2} = 1.056 \text{ N}$ .

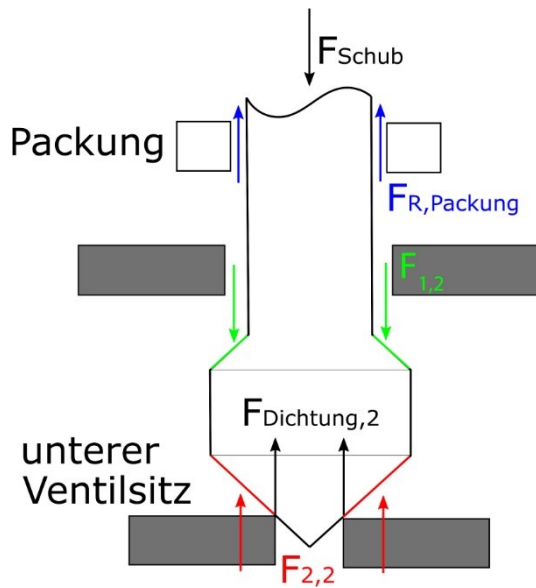


Abbildung 16: Lastfall 2: An der Ventilschneidunterbrechung wirkende Kräfte bei Schneidunterbrechung

Die jeweils wirkenden Betriebskräfte für die unterschiedlichen Lastfälle, welche auf die Ventilschneidunterbrechung wirken, sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Lastfallunterscheidung und jeweils auf die Ventilschneidunterbrechung wirkende Kräfte

Lastfall	Berechnungsgrundlage	Beanspruchung	Last auf Ventilschneidunterbrechung
1	$F_{\text{Dichtung},1} + F_{\text{R, Packung}} + F_{1,1} - F_{2,1}$	Zug	2.844 N
2	$F_{\text{Dichtung},2} + F_{\text{R, Packung}} - F_{1,2} + F_{2,2}$	Druck	1.510 N

Zur Betätigung der Ventilschneidunterbrechung muss ein Pneumatikzylinder verwendet werden, welcher die berechneten Kräfte für beide Betriebsmodi mindestens aufbringen muss. Da eine Ventilschneidunterbrechung sowohl durch Zug-, als auch Druckbelastung ausgeführt wird, muss der Pneumatikzylinder Kräfte in beide Richtungen aufbringen können. Es wird entsprechend ein doppeltwirkender Pneumatikzylinder verwendet. Es ist darüber hinaus zielführend, bei der Auswahl eines Antriebs zu berücksichtigen, dass der Auslegungsbetrieb bei lediglich ca. 80 % der maximalen Leistung bzw. der maximalen Kraft erfolgt. Dadurch stehen Reserven zur Verfügung, falls die bei der Auslegung getroffenen Annahmen geringfügig von dem sich real einstellenden Einbauzustand abweichen oder wenn im Betrieb Veränderungen von Reibwerten oder Dichtflächen eintreten.

Es wurde entsprechend der Erläuterungen ein pneumatischer Kompaktzylinder der Firma IMI Norgren vom Typ RA/192100/MX/15 gewählt. Dieser verfügt über eine Ab-

messung von 100 mm x 100 mm und einen Zylinderhub von 15 mm. Durch seine doppeltwirkende Funktionsweise kann er sowohl Druck- als auch Zugkräfte aufbringen. Bei einem Betriebsdruck von 600 kPa liefert der Antrieb eine Zugkraft von 4.416 N sowie eine Druckkraft von 4.710 N. Die vom Antrieb bereitgestellte Kraft liegt damit insbesondere während der Schneidunterbrechung bei der Belastung der Ventilspindel auf Druck deutlich über der benötigten Antriebskraft. Es erfolgt daher eine Kompensation durch ein Federpaket. Dieses befindet sich unterhalb des Antriebs und ist im Schneidbetrieb entspannt (vgl. Abbildung 17 (2)). Beim Herstellen der Schneidunterbrechung und dem Absenken der Ventilspindel wird das Federpaket gestaucht und wirkt so dem Ventilantrieb entgegen. Das Federpaket besteht aus insgesamt zwölf Tellerfedern mit den Dimensionen 50 mm x 18,4 mm x 1,5 mm.

Die CAD-Baugruppendarstellung in Abbildung 17 zeigt das konstruierte Schaltventil von außen. Es ist zu erkennen, dass das Federpaket in einem Gehäuse (2) untergebracht ist, um Verschmutzungen und korrosive Einflüsse im Betrieb zu verhindern. Darunter befindet sich das aus mehreren Einzelteilen bestehende Ventilgehäuse (4, 6, 9, 10) mit zwei Anschlüssen für die beiden notwendigen Medien: Spülstrom (5) und Schneidsuspension (8). Das mehrteilige Ventilgehäuse ist über standardisierte 11/16“ HP-Verschraubungen (7, 11) mit dem Ventiltrieb (1) bzw. dem Kollimationsrohr (12) verbunden. Am Austritt des Kollimationsrohrs befindet sich die in einer Überwurfmutter (13) befestigte Hartmetalldüse (14) aus der der Wasserabrasivstrahl an die Atmosphäre austritt.

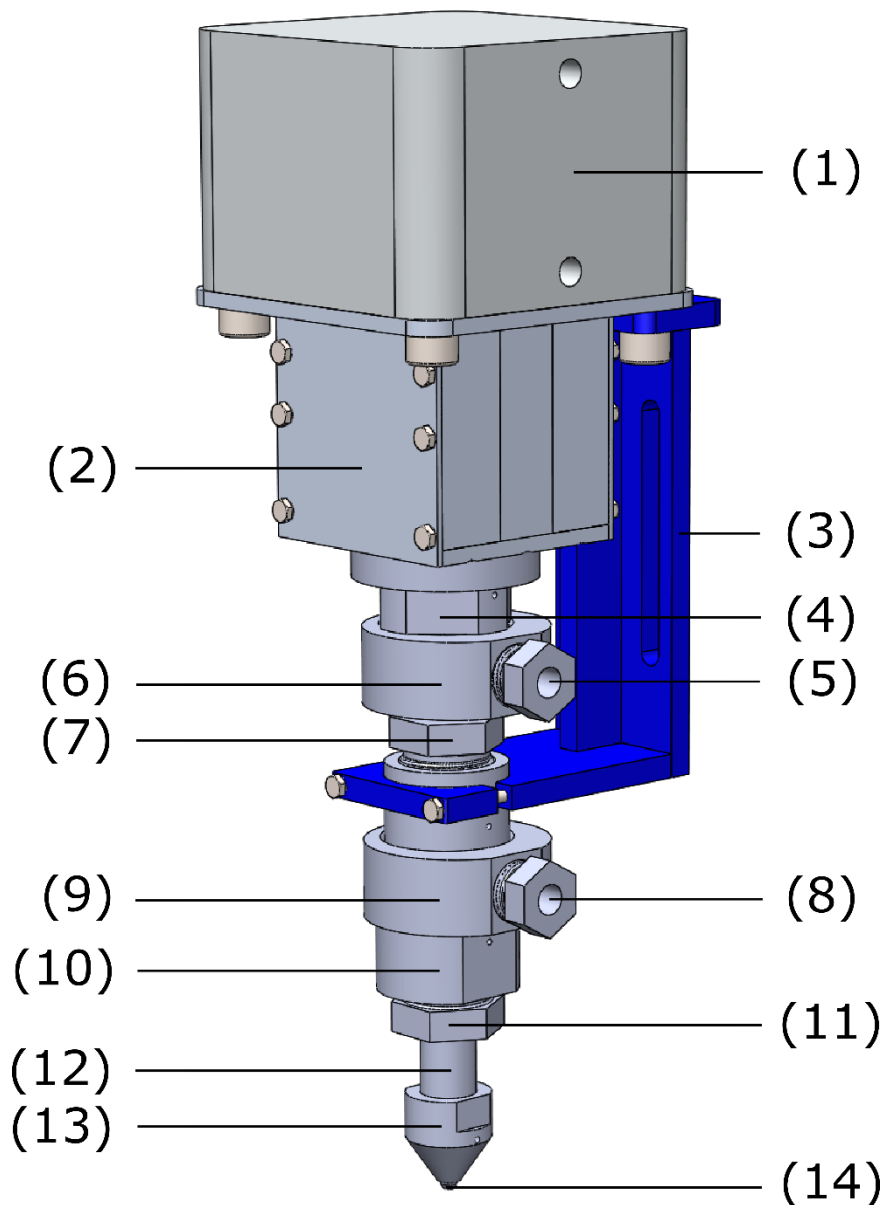


Abbildung 17: CAD-Ansicht der Ventilbaugruppe; (1) Pneumatikkompaktzylinder; (2) Federpaketgehäuse; (3) Ventilhalterung; (4) oberes Ventilgehäuse; (5) Druckschraube Spülstrom; (6) Anschlussring Spülstrom; (7) 11/16"-Hochdruckverschraubung; (8) Druckschraube Schneidsuspension; (9) Anschlussring Schneidsuspension; (10) unteres Ventilgehäuse; (11) 11/16"-Hochdruckverschraubung; (12) Kollimationsrohr; (13) Düsenhalter; (14) Hartmetalldüse

In der in Abbildung 18 dargestellten CAD-Schnittansicht ist der innere Aufbau des Schaltventils abgebildet. Der doppelwirkende Pneumatikkolben (15) ist über eine Ventilspindelaufnahme (16) mit der Ventilspindel (24) verbunden. Das zur Entlastung der Ventilspindel bei Druckbelastung vorgesehene Tellerfederpaket (18) ist durch zwei Krafterleitscheiben (17,19) eingefasst. Die darunter befindliche Ventilspindeldichtung (20-23) dient der Trennung von Prozessmedien und Ventilspindelantrieb. Zentrales Funktionsbauteil ist dabei der Dichtring aus PTFE (22), welcher durch den Anzug einer

3/8" Druckschraube (20) vorgespannt wird und so an der Ventilspindel dichtet. Die Ventilspindel endet in einem doppelten Konus, welcher zwischen zwei Ventilsitzen eingefasst ist – einem oberen (26) sowie einem unteren (27) Ventilsitz.

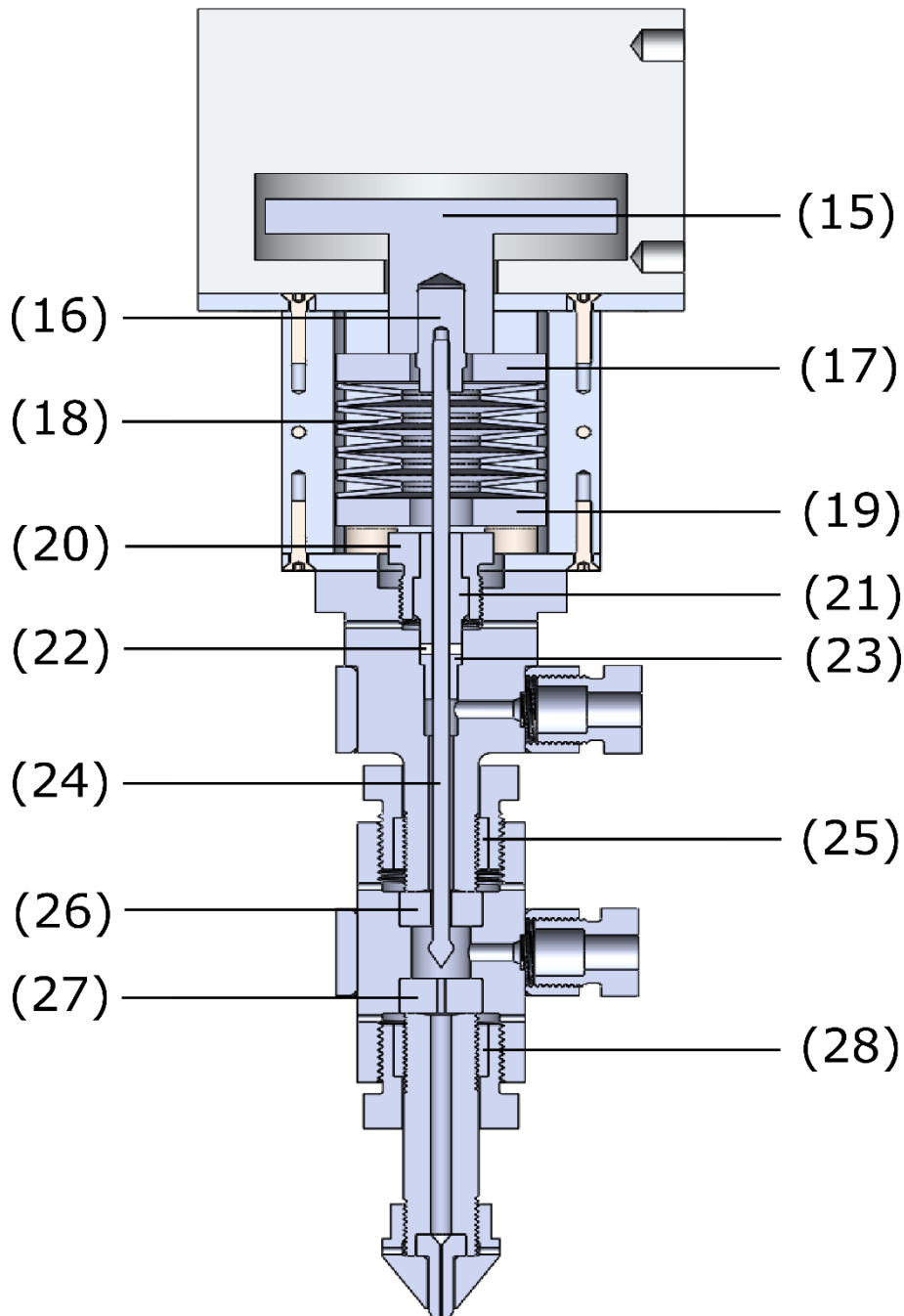


Abbildung 18: CAD-Schnittansicht der Ventilbaugruppe; (15) Doppeltwirkender Pneumatikzylinder; (16) Ventilspindelaufnahme; (17) Krafeinleitscheibe; (18) Tellerfederpaket; (19) Krafeinleitscheibe; (20) 3/8"-Druckschraube; (21) Stopfbuchsbrille; (22) Dichtring; (23) Stützhülse; (24) Ventilspindel; (25) 11/16"-Druckring; (26) oberer Ventilsitz; (27) unterer Ventilsitz; (28) 11/16"-Druckring

Durch die Ausführung des mehrteiligen Ventilgehäuses durch kommerziell verfügbare Hochdruckverschraubungen sowie die SSKV Klemmringverschraubungen für die Medienanschlüsse ist das Ventil zum Schalten von Suspensionen unter Hochdruck vielseitig adaptierbar und somit für fertigungstechnische Anwendungen einsetzbar. Die Fertigungszeichnungen aller verbauten Komponenten befinden sich im Anhang dieses Berichts.

Die Festigkeit der Bauteile wurde mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode nachgewiesen. Es wurde dafür der Ansatz der statischen Auslegung gegen plastisches Fließen verfolgt. Zu beachten ist dabei, dass durch diese Auslegung keine Betriebs- oder Dauerfestigkeit gewährleistet werden kann. Für einen kommerziellen Einsatz ist diese jedoch zwingend erforderlich. Aufgrund der vorherrschenden Druckwechselbelastung kann diese durch die Autofrettage der Komponenten erreicht werden. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auftretende Zahl von wenigen 100 Lastspielen macht diese festigkeitssteigernde Maßnahme jedoch nicht erforderlich.

Das Bauteil mit der geringsten Wandstärke und damit das mit der höchsten Gefährdung ist das obere Ventilgehäuse. Abbildung 19 zeigt dieses Bauteil bei einer Innendruckbeaufschlagung von 45 MPa. Farbcodiert ist der Sicherheitsfaktor gegen plastisches Fließen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dieser an der Innenfaser des Bauteils mindestens etwa 2,01 beträgt. Ein Fließen an der der Innenfaser ist zudem nicht zwingend als kritisch zu betrachten, wenn ein entsprechender Sicherheitsfaktor an der Außenfaser vorliegt. Dieser beträgt in dem vorliegenden Fall  $s > 15$ . Die Bauteilfestigkeit ist im untersuchten, statischen Fall daher uneingeschränkt gewährleistet und das Teil kann für die experimentelle Erprobung mit einer geringen Anzahl von Lastspielen verwendet werden.

Sicherheitsfaktor

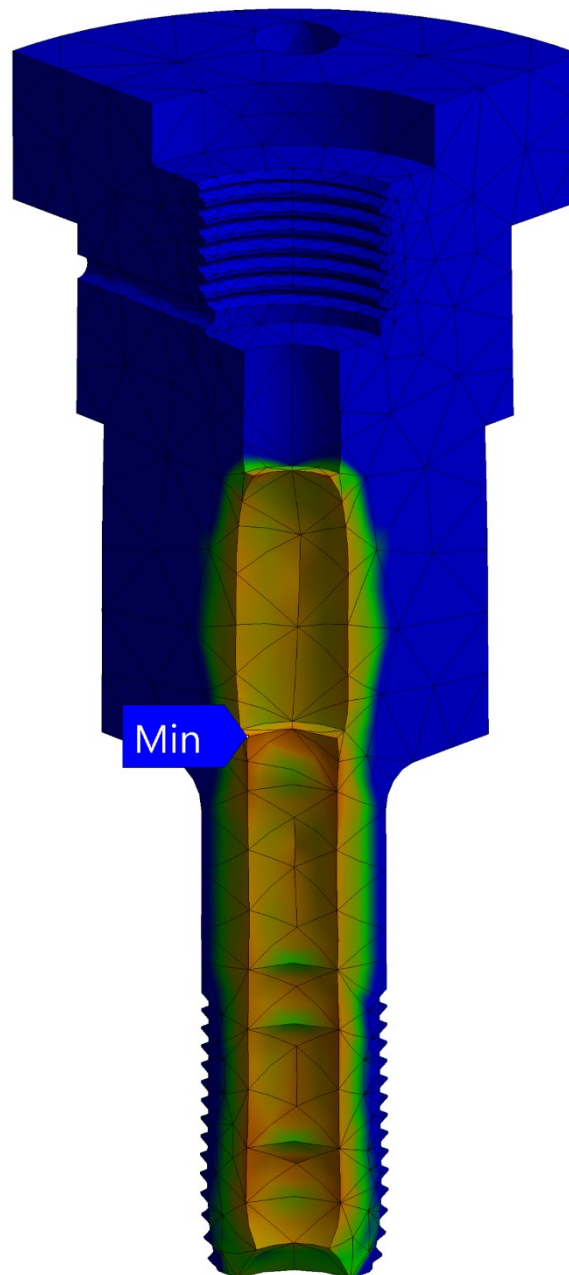
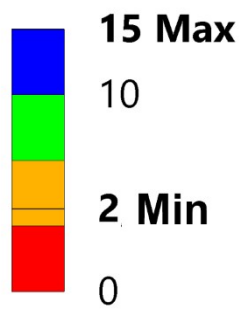


Abbildung 19: FEM-Simulation des oberen Ventilgehäuses bei einer Innendruckbeaufschlagung mit einem Betriebsdruck von 45 MPa; Farblich dargestellt: Sicherheitsfaktor gegen plastisches Fließen

Der Sicherheitsfaktor von  $s > 15$  an der Außenfaser kann auch beim unteren Ventilgehäuse sowie dem Kollimationsrohr gewährleistet werden (vgl. Abbildung 20). Auch an der Innenfaser tritt jeweils kein plastisches Fließen auf.

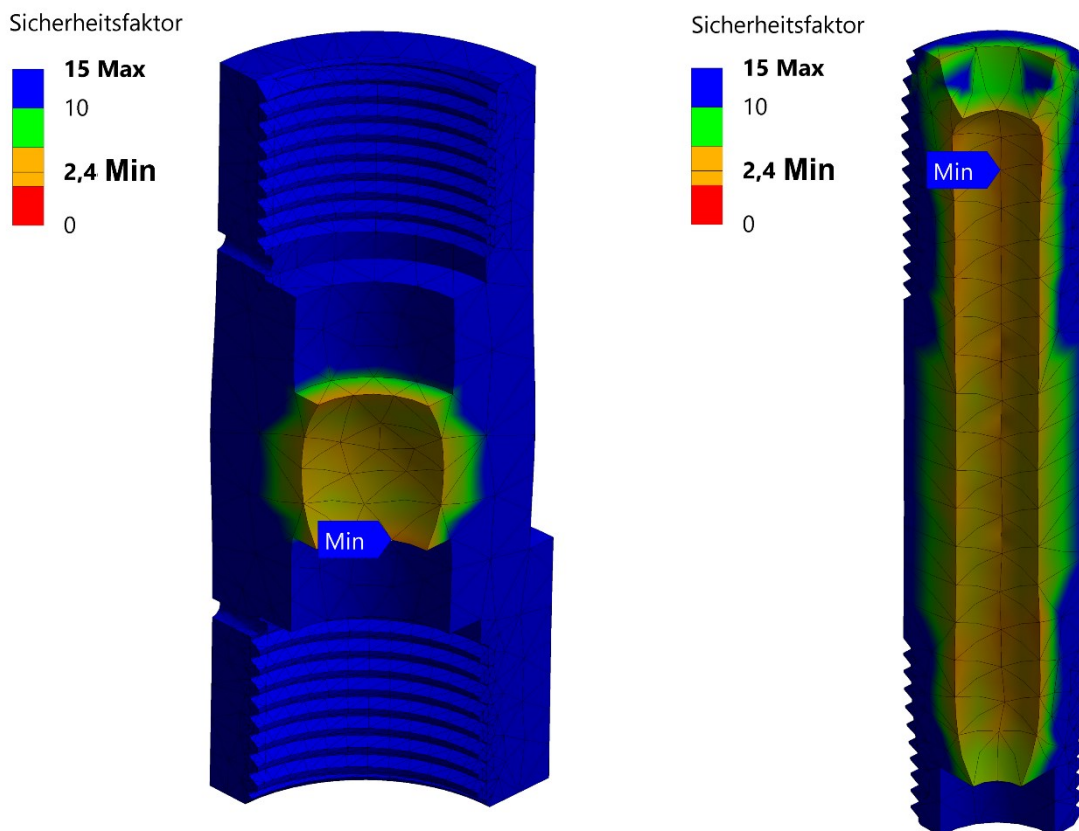


Abbildung 20: FEM-Simulation des unteren Ventilgehäuses (links) und des Kollimationsrohres (rechts) bei einer Innendruckbeaufschlagung mit einem Betriebsdruck von 45 MPa; Farblich dargestellt: Sicherheitsfaktor gegen plastisches Fließen

Die konstruierten Komponenten sind damit für die Verwendung mit einem Betriebsdruck von 45 MPa ausgelegt und können der experimentellen Erprobung zugeführt werden.

#### AP 10: Entwicklung von Strategien zur Drehzahlregelung

Der Schaltvorgang erfordert ein Umschalten der Pumpe zwischen dem Medienfördernden Betrieb und Stillstand. Das ist notwendig, da für das WASS ausschließlich direkt angetriebene Plungerpumpen eingesetzt werden. Plungerhub und Antrieb sind dabei direkt mechanisch gekoppelt. Es ist daher notwendig, dass das geförderte Medium beim Pumpenbetrieb aus dem Pumpenkopf gefördert wird. Wird das Schaltventil geschlossen, ist das nicht mehr gewährleistet. Es ist daher notwendig, dass die Pumpe während des Schaltvorgangs definiert zum Stillstand gebracht wird. Die einfachste Umsetzung ist dabei die Unterbrechung der Energiezufuhr (elektrischer Schalter) zum Zeitpunkt des Ventilschließens. Durch die undefinierte, zeitliche Abfolge kann es dabei zu Druckspitzen im System kommen, sodass es zielführend sein kann, einen Zeitversatz

der beiden Schaltvorgänge vorzunehmen. Ein Abschalten der Pumpe kurz vor dem Ventilschließen kann dabei einen unzulässigen Pumpennachlauf und daraus resultierende Druckspitzen verhindern. Um diesen Zeitversatz zu minimieren und die Dynamik der Pumpe zu maximieren, kann durch die Verwendung eines Frequenzumrichters (FU) eine gezielte Bremsrampe des Pumpenantriebs programmiert werden. Der Betrieb mit einem FU ermöglicht zudem auch ein definiertes Wiederauffahren, was insbesondere bei der Fertigung von Bauteilen mit Innenkonturen und dadurch nötiger. Häufiger Schneidunterbrechung von erheblichem Vorteil sein kann.

Tabelle 5: Varianten der Steuerung der Pumpendrehzahl beim Ventilschalten

Schaltstrategie	Dynamik	Pumpenanlauf	Komplexität
Zeitgleiches Schalten	-	-	+
Zeitversetztes Schalten	o	-	o
Frequenzumrichter	+	+	-

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter zwar eine erhöhte Komplexität des elektronischen Steuerungssystem erfordert, die funktionalen Vorteile jedoch überwiegen.

#### AP 11: Aufbau einer Drehzahlregelung

Entsprechend der Erläuterungen wurde im Rahmen dieses Vorhabens ein Frequenzumrichter für die Regelung der Pumpendrehzahl installiert. Verbaut wird ein FU vom Typ Siemens Micromaster 420. Dieser ist mit einem Advanced Operator Panel (AOP) ausgestattet, welches die interne Programmierung des FU ermöglicht (vgl. Abbildung 21).



Abbildung 21: Im Schaltkasten der WASS Anlage verbauter Frequenzumrichter vom Typ Siemens Micromaster 420

Die Ansteuerung des Frequenzumrichters erfolgt wie die gesamte Ventilsteuerung durch eine SPS vom Typ Siemens LOGO! (vgl. Abbildung 22).



Abbildung 22: Im Schaltkasten verbaute SPS des Typs Siemens LOGO! Zur Steuerung des Ventilschaltens und Pumpen Aus- und Anlauf

Die gesamte elektronische Anlagensteuerung ist spritzwassergeschützt im Schaltkasten der WASS Anlage vom Typ miniMACE verbaut. In Abbildung 23 ist die Programmierung der SPS dargestellt. Für den Anwender sind vier Funktionstasten (F1-F4) verfügbar. Diesen Tasten sind folgende Funktionen zugeordnet:

- F1: Pumpe EIN/AUS
- F2: Ventalnadel absenken, Zeitverzögerung x, Pumpe AUS
- F3: Ventalnadel anheben, Pumpe AN
- F4: Ventalnadel AUF/AB

Für einen kommerziellen Betrieb sind die kombinierten Funktionen F2 und F3 vorgesehen. Diese ermöglichen es dem Anwender ohne Kenntnis der Schaltverzögerung bzw. der Abhängigkeit von Pumpe und Schaltventil dieses mit einem einfachen Tastendruck zu schließen oder zu öffnen und damit den Schneidbetrieb zu starten bzw. einzustellen.

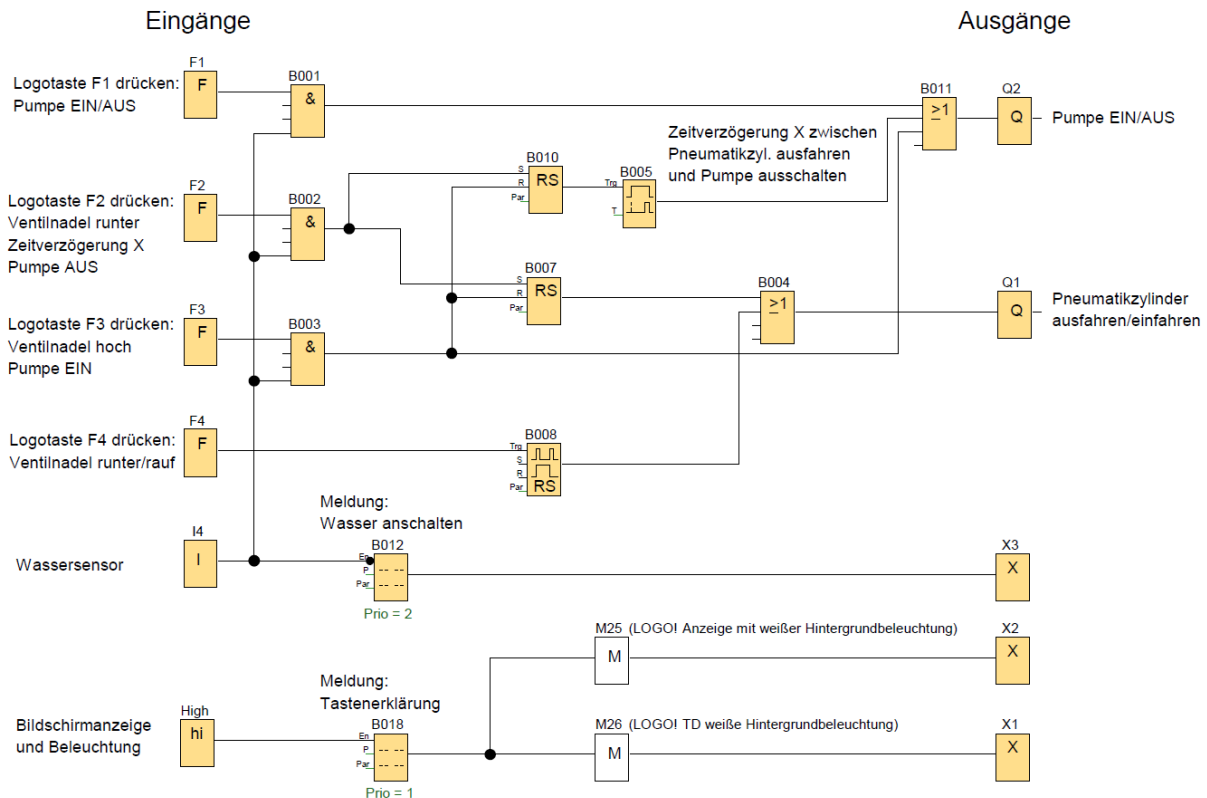


Abbildung 23: Programmierung der Siemens LOGO! Zur Steuerung des Ventilschaltens und des Frequenzumrichters zur Drehzahlregelung der Hchdruckpumpe

Als User-Interface dient ein mehrzeiliges LCD-Display, welches neben einer kurzen Beschreibung der Funktionstaten auch Statusmeldungen ausgeben kann. Unter anderem wird der Anwender informiert, wenn kein hinreichender Speisewasserdruck am Pumpeneinlass vorliegt. Detektiert wird das über einen Wassersensor, durch welchen die SPS die Meldung „Wasser anschalten“ an den Anwender ausgeben kann (vgl. Abbildung 23).

#### AP 12: Fertigung eines schaltbaren Suspensionsschneidkopfs

Für die experimentelle Erprobung der entwickelten Komponenten bzw. der Ventilbaugruppe mitsamt der entwickelten Ventilsteuerung wurden sämtliche Bauteile im Rahmen dieses Vorhabens spanend gefertigt. Die Fertigung erfolgt mittels konventioneller und CNC Dreh- und Fräsbearbeitung. Die Bauteile werden keiner zusätzlichen Wärme- oder Oberflächenbehandlung unterzogen. Das dient der Kosteneffizienz für die experimentelle Erprobung. Da nur eine geringe Anzahl von Lastzyklen zu erwarten ist, kann auf verschleißbeständige Beschichtungen oder die Autofrettage von druckbeaufschlagten Komponenten verzichtet werden. Beide Maßnahmen können im kommerziellen Betrieb dazu beitragen, die Lebensdauer der Komponenten zu erhöhen.

Für deren Anwendung sind keine Änderungen an der Auslegung oder der Konstruktion der einzelnen Bauteile vorzunehmen. Die im Rahmen dieses Vorhabens erstellten Fertigungszeichnungen können entsprechend auch unter Anwendung von lebensdauersteigernden Werkstoffbehandlungen weiterverwendet werden. Sämtliche technischen Zeichnungen sind im Anhang ab Seite 59 aufgeführt.

An die verwendeten Werkstoffe werden hohe Anforderung hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit gegenüber wässrigen Medien gestellt. Dazu zählt insbesondere die Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion. Die zusätzlich erforderliche hohe Festigkeit aufgrund der hohen Betriebsdrücke schränkt die Werkstoffauswahl auf eine kleine Gruppe rostfreier Edelstähle ein. Die erhöhten Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit schränken die Verwendbarkeit der umgangssprachlich unter dem Überbegriff V2A zusammengefassten Edelstähle (1.4301/1.4305) stark ein. Für druckbeaufschlagte Komponenten ist die Verwendung von ugs. als V4A bezeichneten Stähle (1.4404/1.4435/1.4571) notwendig. Die spanende Bearbeitung der Werkstoffe erfolgt mit konventionellen HSS- und Hartmetallwerkzeugen.

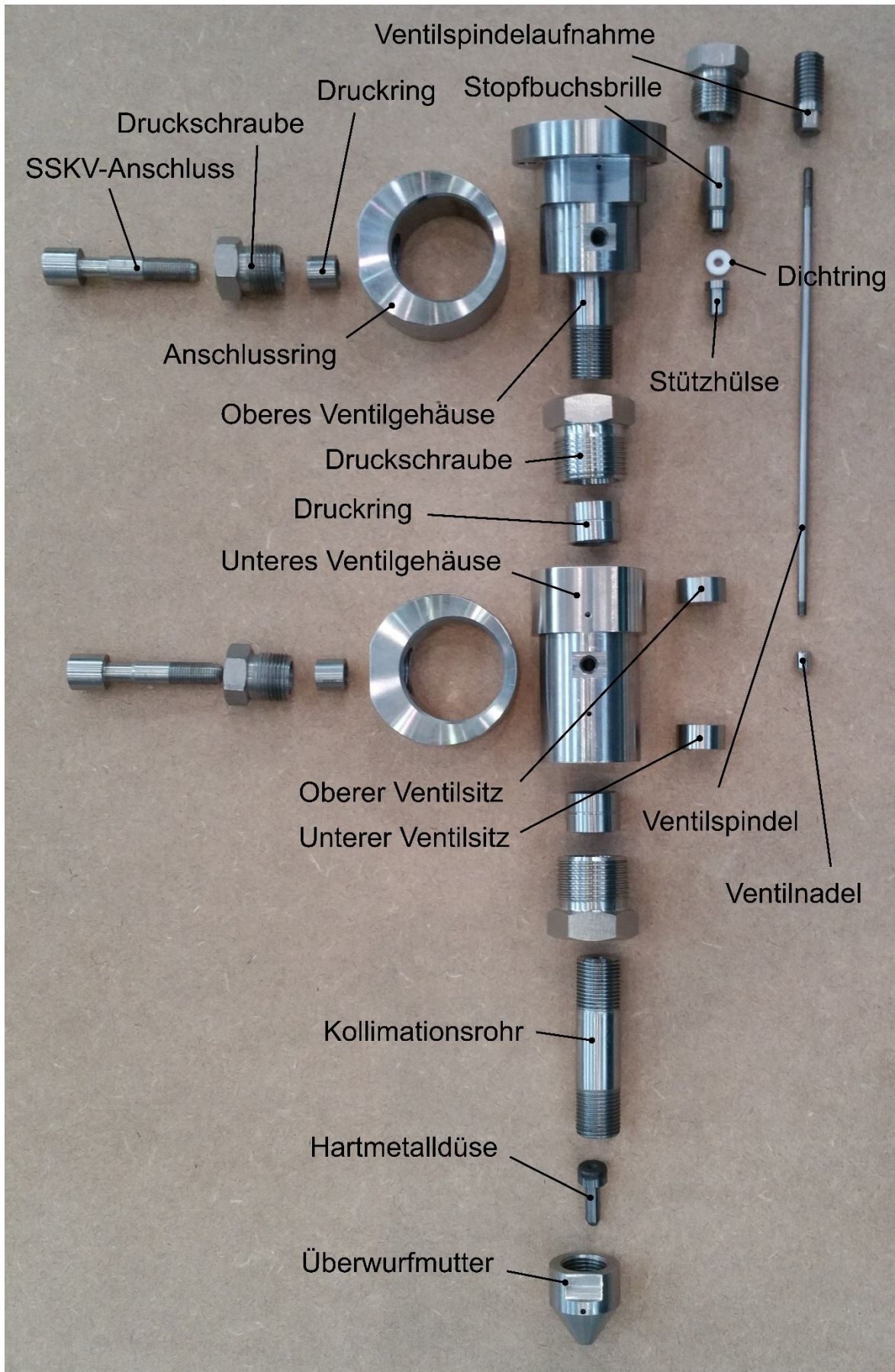


Abbildung 24: Einzelteile der gefertigten Ventilbaugruppe für die experimentelle Erprobung

### AP 13: Experimentelle Erprobung des Suspensionsschaltventils

Nach der Bauteilfertigung wurde die Ventilbaugruppe mit allen peripheren Komponenten, wie dem pneumatischen Antrieb und die Medienzufuhr montiert und experimentell erprobt. Als Werkstück wird ein Flachstahl aus dem Werkstoff S235JR verwendet. Die Materialstärke beträgt 5 mm. Für eine grundlegende Ermittlung der Funktionsfähigkeit des Schaltventils muss die Umschaltfunktion zwischen Schneidsuspension und Reinwasserspülung prozesssicher gewährleistet sein. Eine direkte optische oder taktile Unterscheidung zwischen Reinwasser und Suspension am Düsenaustritt ist nicht möglich, sodass eine indirekte Bewertung anhand der Kerbwirkung vorgenommen wurde. Dazu wurde das gefertigte Schaltventil fest montiert und das Werkstück darunter platziert (vgl. Abbildung 25). Es ist bekannt, dass ein Baustahl mit 5 mm Materialstärke nicht durch einen Reinwasserstrahl getrennt werden kann. Ist eine Durchbohrung des Werkstücks feststellbar, kann damit nachgewiesen werden, dass das Schaltventil die Schneidsuspension freigegeben hat. Ist anschließend eine Unterbrechung des Wasserstrahls möglich, ist damit auch die Spülfunktion und damit die vollständige Funktion des Ventils gewährleistet.



Abbildung 25: Experimentelle Ermittlung der Funktionsfähigkeit des Schaltventils zum verschleißarmen Schalten von Suspensionen

Abbildung 26 zeigt die durch den Suspensionsstrahl entstandenen Bohrungen des Werkstücks. Da das Schaltventil statisch montiert ist, entspricht der Loch- im Wesentlichen dem Strahldurchmesser.

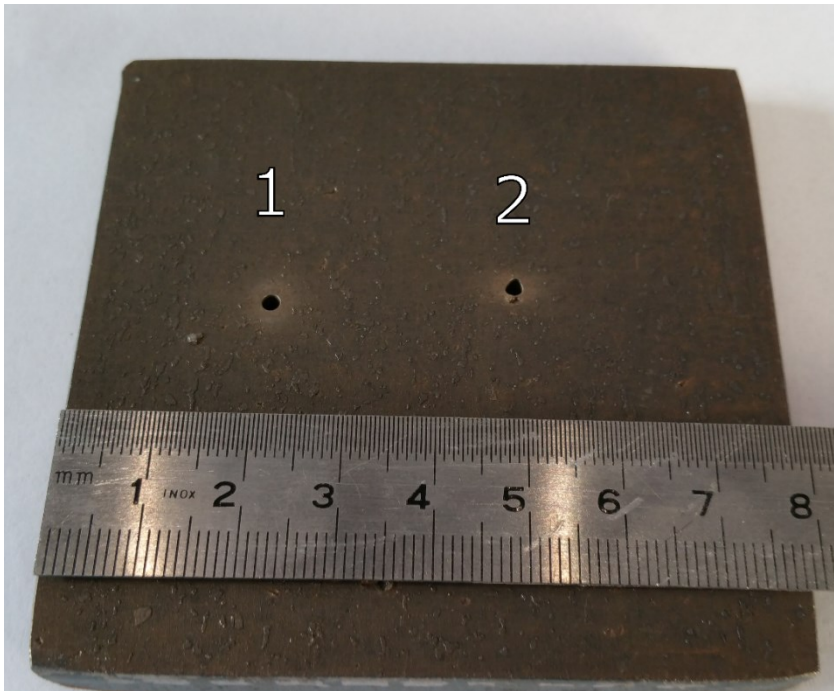


Abbildung 26: Mit dem Wasserabrasivstrahl erzeugte Bohrungen in dem Baustahl S235JR mit einer Materialstärke von 5 mm

Mit dem Durchstechen des Materials und Austritt des Wasserstrahls auf der Unterseite des Werkstücks kann die Funktionsfähigkeit des Schaltventils als nachgewiesen angesehen werden. Für weitere Versuche wird das Schaltventil an eine 3-Achs Führungsmaschine montiert. Dadurch kann das Ventil auch zur Anfertigung von Bauteilausschnitten erprobt werden. Der Startpunkt liegt dabei bereits auf dem Blech, sodass Anstich, Anschnittfahne, Bauteilkontur und Auslauffahne Teil des Schnitts sind. Das entspricht dem Trennen eines typischen, wasserstrahlgeschnittenen Bauteils. Als Werkstück wurde für die Versuche ein 3 mm starker, korrosionsbeständiger Edelstahl verwendet (vgl. Abbildung 27).



Abbildung 27: An einer Führungsmaschine montiertes Schaltventil zum verschleißarmen Schalten von Suspensionen mit montiertem Gummi-Spritzschutz und darunter platziertem Werkstück aus korrosionsbeständigem Edelstahl

Durch die Möglichkeit der Strahlunterbrechung und wiederholten Freigabe ist es möglich, Bauteile mit Innenkonturen zu fertigen. Die Fertigung eines solchen Bauteils ist in Abbildung 28 dargestellt.

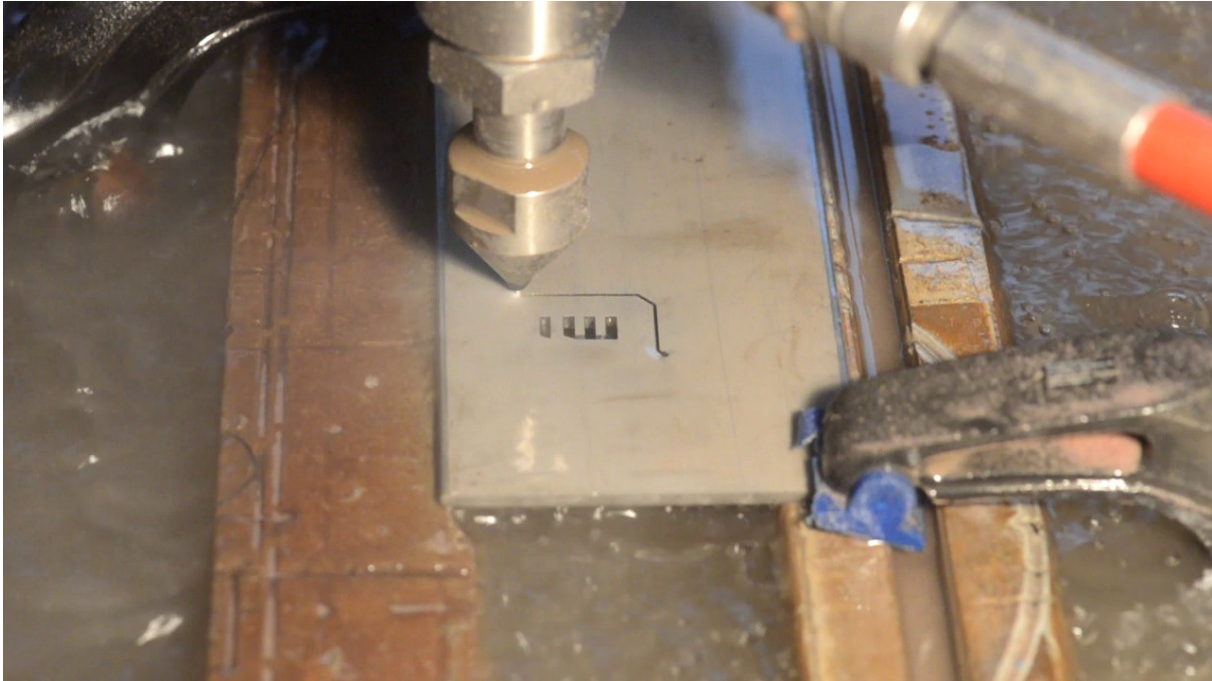


Abbildung 28: Fertigung eines Bauteils mit Außen- und zwei Innenkonturen mittels Wasserabrasivsusensionsstrahl

Durch die Möglichkeit der Fertigung von Innenkonturen sowie der Setzung von Anschnitten innerhalb des Bleches, werden technologische Nachteile der Wasserabrasivsusensionsstrahltechnologie gegenüber der Wasserabrasivinjektorstrahltechnologie kompensiert und verfahrensspezifische Vorteile können wirtschaftlich nutzbar gemacht werden. Durch den physikalisch bedingten höheren Gesamtwirkungsgrad kann das Wasserstrahlschneiden durch das im Rahmen dieses Vorhaben entwickelte Schaltventil zukünftig ressourcenschonender, energieeffizienter und wirtschaftlicher eingesetzt werden. Das Gesamtziel des Vorhabens ist damit erfüllt.

## **7. Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Die für den Projektzeitraum bewilligten Mittel wurden vollständig ausgeschöpft. Dabei wurden gemäß Finanzierungsplanung Mittel für Personalausgaben veranschlagt und verwendet. Zusätzlich waren wie beantragt Mittel für den Aufbau des vorführbaren prototypischen Schneidventils erforderlich, welche diverse Kleinteile umfassen, wie z.B. Acrylglas, Rundstahl zur Fertigung der Bauteile Bearbeitungswerkzeuge, Schneiddüsen, Lager, Kolben und Spindeln. Da diese Teile ausschließlich projektspezifisch genutzt werden konnten war hierbei eine Finanzierung aus der Grundausstattung des Institutes ausgeschlossen. Die angestrebten Projektergebnisse wurden vollständig erreicht.

## 8. Begründung zur Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren für die Erfüllung der Aufgaben notwendig und ausreichend. Die durch das Institut für Werkstoffkunde durchgeführten Arbeiten hätten ohne die bereitgestellte Förderung, der Landesmittel und der Mittel des Industriepartners nicht durchgeführt werden können. Die erzielten Ergebnisse des Vorhabens und die bei der Projektbearbeitung gewonnenen Methoden- und Prozesskenntnisse bieten dem Institut für Werkstoffkunde aufgrund ihrer Praxisrelevanz am Markt einen unmittelbaren Mehrwert und gehen sowohl in die Forschungsarbeit im Wasserstrahllabor als auch in die studentische Ausbildung z.B. durch die Vorlesung „Verfahren der Schweiß- und Schneidtechnik“ im Rahmen des Masterstudiengangs Maschinenbau der Fakultät für Maschinenbau ein.

## 9. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die vom IW erbrachte Projektleistung „Suspensionsstrahlschaltventil“ ist im Grundsatz kein eigenständiges, separat nutzbares bzw. vermarktbare Produkt, sondern Bestandteil des Gesamtprodukts „Wasserstrahlschneidanlage“. Im Hinblick auf Fragen wie Nutzen und die Verwendbarkeit des Schaltventils in der Praxis, Weiterentwicklungen, Zeithorizont bis zu einer möglichen Markteinführung u.ä. wird hier auf die bisher erfolgten Ausführungen der Informationsveranstaltungen im Arbeitskreis Wasserstrahltechnologie, welcher als Industriearbeitskreis vom IW speziell für die Branche des Wasserstrahlschneidens organisiert wird, verwiesen.<sup>1</sup>

Dort wurden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert, wobei ein reges Interesse an dieser Ventillösung zur Einführung der WASS Technik auf klassischen Lohnschneidmaschinen als sehr aussichtsreich beschrieben wird. Allein der Nachweis der Verschleißfestigkeit und damit Langlebigkeit des Ventils mit möglichst vielen Schaltvorgängen steht noch aus. Hierzu ist eine weitere bilaterale Zusammenarbeit mit der Partnerfirma Perndorfer angestrebt.

## 10. Veröffentlichungen

Lfd. Nr.	Titel der Veröffentlichung	Art (Artikel, Studie, Buchbeitrag, etc.)	Medium (Verlag, Zeitschrift, Broschüre, Tagungsunterlage)	Referenz	Datum

<sup>1</sup> <https://www.awt.uni-hannover.de/de/>

1	<b>VentiSus – Ventil zum Schalten von Suspensionen</b>	Vortrag	Tagungsun- terlage	63. AWT Sitzung am 09.10.23 in Hannover	2023
---	--	---------	-----------------------	--	------

## 11. Literatur

1. Kolb, M. *Wasserstrahlschneiden: Materialbearbeitung mit einem Hochdruckwasserstrahl*; Verl. Moderne Industrie: Landsberg/Lech, 2006, ISBN 9783937889474.
2. SITEC-Sieber Engineering AG. *Katalog HP-Verschraubungen*, 2019.
3. Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN EN ISO 15156-1: Erdöl- und Erdgasindustrie - Werkstoffe für den Einsatz in H<sub>2</sub>S-haltiger Umgebung bei der Öl- und Gasgewinnung: Teil 1: Allgemeine Grundlagen für die Auswahl von gegen Rissbildung beständigen Werkstoffen (ISO/FDIS 15156-1:2020); Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 15156-1:2020*, 2020.
4. Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN 3387: Lösbare Rohrverbindungen für metallene Gasleitungen*, 1991.
5. Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN EN 1829-2: Hochdruckwasserstrahlmaschinen - Sicherheitstechnische Anforderungen - Teil 2: Schläuche, Schlauchleitungen und Verbindungselemente*, 2012.
6. Deutsches Institut für Normung e. V. *DIN EN 12162: Flüssigkeitspumpen - Sicherheitstechnische Anforderungen - Prozessverfahren für hydrostatische Druckprüfung 2010*.
7. *Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt* Text von Bedeutung für den EWR.
8. Sauer, B. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2018, ISBN 978-3-642-39502-4.
9. Czichos, H.; Habig, K.-H. *Tribologie-Handbuch*; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2020, ISBN 978-3-658-29483-0.

## **Anhang**

### *Technische Zeichnungen*