

# Sachbericht

## KMU-INNOVATIV: RESSOURCENEFFIZIENZ UND KLIMASCHUTZ

**Thema:** Steigerung der Rohstoffeffizienz spanender Fertigungsverfahren mit Hilfe kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung

**Kurztitel:** CryoEfficiency

**Förderkennzeichen:** 033RK096A

**Teilvorhaben:** Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik

**Laufzeit:** 01.08.2021 – 31.12.2023

**Berichtszeitraum:** 01.08.2021 – 31.12.2023

**Berichtsgliederung:** Teil I: Kurzbericht  
Teil II: Eingehende Darstellung

**Partner:** acp Systems AG

advanced  
clean production | acp-systems.com

IPlaCon GmbH

IPlaCon

Westsächsische Hochschule  
Zwickau

WHZ Westsächsische  
Hochschule Zwickau  
Hochschule für Mobilität

Deloro Wear Solutions GmbH

Deloro

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil 1: Kurzbericht

### KMU-innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz CryoEfficiency Förderkennzeichen: 033RK096A

#### 0 Ursprüngliche Aufgabenstellung

Metallegierungen, für extrem Verschleiß-, Temperatur- oder korrosiv beanspruchte Bauteile bestehen häufig aus hochwertigen (Kosten), sozialpolitisch-kritischen (Abbaubedingungen) sowie strategisch wichtigen Rohstoffen wie Nickel oder Kobalt. Eine Steigerung der Rohstoffeffizienz ist aufgrund ständiger Verknappung und steigender Nachfrage dauerhaft erforderlich.

Die spanende Fertigteilherstellung ist rohstoffintensiv, dabei werden je nach Bauteil bis zu 80% des Materialvolumens zerspannt und fallen in Form von Spänen an. Die Späne sollen unter bestimmten Voraussetzungen als wesentlicher Bestandteil neuer Schmelzen direkt wiederverwendet und somit zu neuen Gussteilen verarbeitet werden. Der aktuelle Stand der Technik in Industrie und Forschung erfordert jedoch prozesstechnologisch die Verwendung von Kühl- schmierstoffen auf Emulsionsbasis bei der Zerspanung. Dabei werden die Werkzeugschneiden im Prozess gekühlt und geschmiert und somit die erforderlichen Werkstückqualitäten, Werkzeugstandzeiten sowie Kostenvorgaben erreicht. Allerdings verunreinigen die Kühl- schmierstoffe die Späne und führen zur Anreicherung dieser mit Kohlenstoff, sodass die Wie- derverwendbarkeit der Späne ausgeschlossen und somit die Kreislaufwirtschaft unterbrochen ist. Ein nachträgliches Reinigen dieser Späne ist nicht möglich.

Die Hauptaufgabenstellung im Projekt war daher die Kreislaufwirtschaft zu schließen, durch die Substitution der Kühlstrategie. Das Hauptziel ist die **Steigerung der Ressourceneffizienz** schwer bearbeitbarer Materialien auf **Kobalt- und Nickelbasis** durch die **Trockenlegung spanender Fertigungsverfahren** mit Hilfe **kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung**. Hierbei handelt es sich um eine rückstandsfreie Kühlung bei der eine negative Beeinflussung der Werkstückoberfläche ausgeschlossen werden kann. Somit werden Verunreinigungen an **Spänen** vermieden, deren **Wiederverwendbarkeit** in weiteren Herstellungsprozessen gesichert und eine **ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft** geschaffen.

Der Einsatz kryogener Kühlung mit CO<sub>2</sub> in der Zerspanung ist bereits erfolgreich im Rahmen von Forschungsprojekten untersucht worden, die jedoch Grundlagencharakter hatten. Eine Betrachtung einer durchgängigen Komplettbearbeitung von Bauteilen die mehrere spanende Fertigungsverfahren umfassen, mit in bestehende Maschinen industriell integrierbarer, nach- rüstbare CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik gab es bisher nicht. Ein vollumfängliches Umsetzungskonzept für die Umstellung einer Fertigungsstätte auf kryogene Kühlung war ebenfalls nicht vorhanden.

#### 1 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben war in 4 Teilvorhaben (A–D) unterteilt, die den Arbeitspaketen 1-4 entsprechen.

- AP1 / Teilverhaben A: Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik
- AP2 / Teilverhaben B: Gestaltung der Kreislaufwirtschaft
- AP3 / Teilverhaben C: Prozesstechnologische Grundlagenuntersuchungen
- AP4 / Teilverhaben D: Validierung in einer Pilotumgebung



Abbildung: Ablauf des Vorhabens, Arbeitspakete und verantwortliche Projektpartner

Wie in der vorigen ersichtlich sollte die unterbrochene Kreislaufwirtschaft durch die Umstellung der spanenden Fertigungsprozesse auf kryogene Kühlung hergestellt und somit eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft geschaffen werden

Schwerpunkt des Projektpartners acp waren die Entwicklung einer nachrüstbaren und Maschinen-integrierten CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik. Diese beinhaltet eine einheitliche externe Schnittstelle zur Maschine, die Möglichkeit der gezielten Parametereinstellung, die Weiterleitung des CO<sub>2</sub> innerhalb der Maschine einschließlich automatischer Herstellung einer dichten Verbindung beim Werkzeugwechsel, sowie einheitliche Schnittstellen zur Werkzeugaufnahme.

## 2 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens

Der Nachweis der grundsätzlichen Umsetzbarkeit der kryogenen Kühltechnologie mit CO<sub>2</sub> zur Steigerung der Ressourceneffizienz schwer bearbeitbarer Materialien auf Kobalt- und Nickelbasis wurde erbracht. Aufbau und Inbetriebnahme der prototypischen CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik sowie Anwendung der CO<sub>2</sub>-Umsetzungskonzepte zur Integrierung der Kühltechnologie in Bearbeitungszentren in der Laborumgebung der WHZ (mechanische, infrastrukturelle, steuerungs- und Regelungstechnische, sicherheitstechnische Integration) konnten erfolgreich realisiert werden. Mithilfe der spanenden Grundlagenuntersuchungen an markanten ausgewählten Fertigungsverfahren und Verfahrensvarianten konnten Funktionalität, Leistungsfähigkeit, universelle Anwendbarkeit der kryogenen Kühlung in der Laborumgebung der WHZ aufgezeigt werden. Dabei wurde deutlich, dass die kryogene Kühlung gegenüber der Vollstrahlkühlung zu einer wesentlichen Reduktion des Werkzeugverschleißes führt. Dieser Effekt konnte an allen ausgewählten Verfahrensvarianten beim Drehen und schneidstoffübergreifend (Schneidkeramik, CBN, beschichtetes Hartmetall) nachgewiesen werden und kann auch zur Steigerung der Schnittgeschwindigkeit und damit zur Reduktion der Fertigungszeiten genutzt werden. In Bezug auf die Bauteilqualität (Oberflächenrauheit) konnte, beim Schlichtprozessen ebenfalls eine Verbesserung gegenüber der herkömmlichen Vollstrahlkühlung mit Emulsion über die gesamte Einsatzzeit des Werkzeuges festgestellt werden.

Vor dem Hintergrund, höchste Reinheitsanforderungen für das Wiedereinschmelzen der Späne – von kostenintensiven Ni- oder Co-Basislegierungen zu gewährleisten, wurde die Kryogene Kühlung mit CO<sub>2</sub> im Gegensatz zur konventionellen Vollstrahlkühlung mit Emulsion erfolgreich angewendet. Es hat sich gezeigt, dass der Kohlenstoffgehalt bei der konventionellen Zerspanung mit 1,24% den Grenzwert von 0,1 % deutlich übersteigt, wohingegen die Späne nach dem Kryogeneinsatz mit einem C-Gehalt von ca. 0,0087 % diese Grenze deutlich unterschreiten. Eine Wiederverwendung der Späne ist somit durch die Umstellung der Kühlungsschmierstrategie auf kryogene Kühlung möglich. Eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft für die im Projekt verwendeten Legierungen wurde im Projekt erfolgreich umgesetzt.

Durch anschließenden Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich Reduktion der CO<sub>2</sub>-Verbräuche, CO<sub>2</sub>-Zuführung und Werkzeuggestaltung konnten weitere Prozessverbesserungen im Hinblick auf Ressourceneinsatz und Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Die anschließende finale Validierung in der Pilotumgebung beim Projektpartner Deloro konnte daher erfolgreich und reproduzierbar umgesetzt werden. Die abschließende Prozessauswertung durch Projektpartner IPlaCon zeigt anhand der ökonom. und ökologischen Kennzahlen die deutliche Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen der Kreislaufwirtschaft.

## Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil 2: Eingehende Darstellung

### KMU-innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz: CryoEfficiency Förderkennzeichen: 033RK096A

Steigerung der Rohstoffeffizienz spanender Fertigungsverfahren mit Hilfe kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung - Teilvorhaben A: Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik

Akronym: CryoEfficiency

Laufzeit: 01.08.2021 - 31.12.2023

#### Kurzfassung der Vorhabenbeschreibung

Die bei der rohstoffintensiven spanenden Bearbeitung anfallenden Späne können in anderen Wertschöpfungsketten (z.B. erneutes Einschmelzen) wieder eingebracht werden. Speziell bei hochwertigen, seltenen und teuren Werkstoffen wie bspw. Kobalt- und Nickellegierungen müssen die Späne für das Wiedereinschmelzen hohen Qualitätsanforderungen gerecht werden, sodass neue Erzeugnisse einen hohen Reinheitsgrad aufweisen. Bei Anwendung konventioneller Kühlstrategien ist eine derartige Wiederverwendung aufgrund verunreinigter Späne (Anhaftungen sowie Kohlenstoffanreicherungen) nicht mehr möglich und die Kreislaufwirtschaft unterbrochen. Eine reine Trockenbearbeitung oder Wiederaufbereitung der Späne ist nicht möglich.

Der hier verfolgte Lösungsansatz sieht die Substitution der Kühlstrategie durch rückstandsfreie kryogene CO<sub>2</sub>-Kühlung vor. Somit werden Verunreinigungen an Spänen vermieden, deren Wiederverwendbarkeit in weiteren Herstellungsprozessen gesichert und eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft geschaffen.

Die Firmen acp systems AG, IPlaCon GmbH sowie die WHZ entwickeln anlagentechnische, konzeptionell-strukturelle sowie prozesstechnologische Lösungskonzepte zur volumfänglichen Umsetzung kompletter kryogener Prozessketten (CO<sub>2</sub>) für schwer bearbeitbare Materialien auf Kobalt- und Nickelbasis. Dies wird unterstellt durch umfassende Systemanalysen, universelle und adaptierte Planungs-, Fertigungs- und Sicherheitskonzepte, der prototypischen Neu-Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik sowie spanender und werkstoffanalytischer Grundlagenuntersuchungen.

Bei der Deloro Wear Solutions GmbH werden die Lösungskonzepte in einer Pilotumgebung validiert. Der Effekt der Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen der Kreislaufwirtschaft durch das Wiederverwenden der Späne kann direkt im eigenen Haus nachgewiesen werden, da Deloro den ganzheitlichen Herstellungsprozess vom Gießen der Legierungen bis zur finalen spanenden Bearbeitung sowie Qualitätskontrolle abbildet.

**Schwerpunkt dieses Berichtes ist die eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse des Projektpartners acp systems AG und deren weitere Verwertbarkeit.**

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>0 Ursprüngliche Aufgabenstellung .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>2</b>
<b>2 Wesentliche Ergebnisse des Vorhabens .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Einführung / Motivation / Hintergrund.....</b>	<b>6</b>
<b>4 Ziele.....</b>	<b>7</b>
<b>4.1 Gesamtziel des Vorhabens.....</b>	<b>7</b>
<b>4.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (z.B. Förderprogramm)</b>	<b>7</b>
<b>4.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens .....</b>	<b>7</b>
<b>5 Ausführliche Beschreibung der durchgeführten Arbeiten.....</b>	<b>9</b>
<b>5.1 Übersicht, Teilaufgaben und Lösungsweg.....</b>	<b>9</b>
<b>5.2 Balkenplan.....</b>	<b>11</b>
<b>5.3 durchgeführte Arbeiten Projektpartner acp systems AG .....</b>	<b>13</b>
<b>5.3.1 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP1 .....</b>	<b>13</b>
<b>5.3.2 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP2 .....</b>	<b>15</b>
<b>5.3.3 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP3 .....</b>	<b>16</b>
<b>5.3.4 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP4 .....</b>	<b>18</b>
<b>5.4 Meilensteinplanung.....</b>	<b>20</b>
<b>6 Verwertungsplan .....</b>	<b>20</b>
<b>6.1 Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>20</b>
<b>6.2 Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>21</b>
<b>7 Quellenverzeichnis .....</b>	<b>22</b>

### **3 Einführung / Motivation / Hintergrund**

Metallegierungen, die speziell für Bauteile entwickelt werden, die extremen Verschleiß-, Temperatur- oder korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt sind, bestehen häufig aus hochwertigen (Kosten), sozialpolitisch-kritischen (Abbaubedingungen) sowie strategisch wichtigen Rohstoffen wie Nickel oder Kobalt. Der Einsatz solcher Legierungen hat in den letzten Jahren, im Zuge der Verbesserung von Wirkungsgraden technischer Anlagen enorm zugenommen, bspw. in Flugzeugtriebwerken, Förderpumpen, Verbrennungsmotoren und Turboladern. Eine Steigerung der Rohstoffeffizienz ist aufgrund der ständigen Verknappung und steigenden Nachfrage dauerhaft erforderlich.<sup>1</sup>

Ein rohstoffintensiver Prozess ist die spanende Fertigteilherstellung. Dabei werden je nach Bauteil bis zu 80% des Materialvolumens zerspant und fallen in Form von Spänen an. Die Späne könnten unter bestimmten Voraussetzungen als wesentlicher Bestandteil neuer Schmelzen direkt wiederverwendet und somit zu neuen Gussteilen verarbeitet werden. Der aktuelle Stand der Technik in Industrie und Forschung erfordert jedoch prozesstechnologisch die Verwendung von Kühlenschmierstoffen auf Emulsionsbasis bei der Zerspanung. Dabei werden die Werkzeugschneiden im Prozess gekühlt und geschmiert und somit die erforderlichen Werkstückqualitäten, Werkzeugstandzeiten sowie Kostenvorgaben erreicht. Allerdings verunreinigen die Kühlenschmierstoffe die Späne und führen zur Anreicherung dieser mit Kohlenstoff, sodass die Wiederverwendbarkeit der Späne ausgeschlossen und somit die Kreislaufwirtschaft unterbrochen ist. Ein nachträgliches Reinigen dieser Späne ist nicht möglich.

Ein Lösungsansatz bietet die Substitution der Kühlstrategie. Eine reine Trockenbearbeitung ist prozesstechnologisch aufgrund der schweren Zerspanbarkeit von Nickel- und Kobaltlegierungen und der mechanischen sowie thermischen Überlastung des Werkzeuges nicht möglich.<sup>2,3</sup> Alternativ können jedoch die Zerspanungsvorgänge durch den Einsatz kryogener Kühlung mit CO<sub>2</sub> trockengelegt und damit Verunreinigungen an Spänen durch Kühlenschmierstoffrückstände vermieden werden. Hierbei handelt es sich um eine rückstandsfreie Kühlung bei der eine negative Beeinflussung der Werkstückoberfläche ausgeschlossen werden konnte.<sup>4–6</sup> Bei dem einzusetzenden CO<sub>2</sub> handelt es sich um Abfallprodukte anderer Industriebranchen, sodass es nicht um eine CO<sub>2</sub>-Neuemission, sondern sinnvolle Weiterverwendung handelt.

Der Einsatz kryogener Kühlung mit CO<sub>2</sub> in der Zerspanung ist bereits erfolgreich im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte verschiedener Einrichtungen untersucht worden. Diese Untersuchungen haben hierbei jedoch Grundlagencharakter und dienen dem Nachweis der Eignung der kryogenen Kühlstrategie bei einzelnen Fertigungsverfahren an ausgewählten Materialien. Eine Betrachtung einer durchgängigen Komplettbearbeitung von Bauteilen, die mehrere spanende Fertigungsverfahren umfassen, gibt es bisher nicht. Schwer bearbeitbare sowie seltene Materialien wie Kobalt- und Nickelbasislegierungen werden dabei noch nicht ausreichend betrachtet. Industriell einsetzbare und nachrüstbare CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik inkl. der Integration in verschiedene bestehende Maschinen, ist am Markt nur mit technologischen Einschränkungen und verschiedenen Defiziten erhältlich. Ein volumnägliches Umsetzungskonzept für die Umstellung einer kompletten Fertigungsstätte auf kryogene Kühlung ist ebenfalls nicht vorhanden.

## 4 Ziele

### 4.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der hier verfolgte Lösungsansatz sieht die Substitution der Kühlstrategie spanender Fertigungsverfahren durch rückstandsfreie kryogene CO<sub>2</sub>-Kühlung vor. Somit werden Verunreinigungen an Spänen vermieden, deren Wiederverwendbarkeit in weiteren Herstellungsprozessen gesichert und eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft geschaffen.

Das **Hauptziel** ist die **Steigerung der Ressourceneffizienz** schwer bearbeitbarer Materialien auf **Kobalt- und Nickelbasis** durch die **Trockenlegung spanender Fertigungsverfahren** mit Hilfe **kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung**. Somit werden Verunreinigungen an **Spänen** vermieden, deren **Wiederverwendbarkeit** in weiteren Herstellungsprozessen gesichert und eine **ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft** geschaffen.

Die Firmen acp systems AG, IPlaCon GmbH sowie die WHZ entwickeln anlagentechnische, konzeptionell-strukturelle sowie prozesstechnologische Lösungskonzepte zur volumänglichen Umsetzung kompletter kryogener Prozessketten (CO<sub>2</sub>) für schwer bearbeitbare Materialien auf Kobalt- und Nickelbasis. Dies wird unterstellt durch umfassende Systemanalysen, universelle und adaptierte Planungs-, Fertigungs- und Sicherheitskonzepte, der prototypischen Neu-Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik sowie spanender und werkstoffanalytischer Grundlagenuntersuchungen. Bei der Deloro Wear Solutions GmbH werden die Lösungskonzepte in einer Pilotumgebung validiert. Deloro bildet den ganzheitlichen Herstellungsprozess beginnend mit der Materialauswahl, dem Gießen der Legierungen, der spanenden Bearbeitung bis hin zur Montage sowie Qualitätsmanagement ab. Der Effekt der Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen der Kreislaufwirtschaft durch das Wiederverwenden der eigenen Späne in schmelzmetallurgischen Prozessen kann somit direkt im eigenen Haus durch die Lösung der anlagentechnischen, konzeptionell-strukturellen sowie prozesstechnologischen Problemstellung direkt nachgewiesen werden.

### 4.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (z.B. Förderprogramm)

Das Verbundvorhaben RESS-598-042 KMU-innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz: „CryoEfficiency“ adressiert mit der Zielstellung den Förderschwerpunkt „**Rohstoffeffizienz**“ des Förderprogramms „KMU-innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz“.

Insbesondere die Fragestellungen (lt. Bekanntmachung) der

- **ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft** (Kreislaufführung und Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten und Komponenten, ressourceneffizientes Produktdesign und innovative Recycling- und Verwertungsverfahren) sowie der
- **Steigerung der Ressourceneffizienz** vor allem in rohstoffintensiven Verfahren, (z. B. Verarbeitung metallischer und mineralischer Rohstoffe, Herstellung chemischer Grundstoffe und Baustoffe)

werden direkt in diesem Vorhaben adressiert.

Durch die Trockenlegung spanender Fertigungsverfahren mit Hilfe kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung werden Verunreinigungen an Spänen vermieden, deren Wiederverwendbarkeit in weiteren Herstellungsprozessen gesichert und eine **ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft** geschaffen. Dieser geschaffene Recycling-Effekt führt in den rohstoffintensiven Bereichen der spanenden Fertigung sowie schmelzmetallurgischen Rohteilherstellung zu einer erhöhten Rohstoffausnutzung, einer Verbesserung der Energie- sowie CO<sub>2</sub>-Bilanz und somit einer **Steigerung der Ressourceneffizienz** in der Gesamtheit.

### 4.3 Wissenschaftliche und/oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Folgende wichtige Teilschritte/-ziele müssen im Verbundvorhaben fokussiert werden:

- Entwicklung, Auslegung, Konstruktion, Herstellung sowie Transfer einer nachrüstbaren und maschinen-integrierten CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik in prototypischer Ausführung

- Entwicklung, Auslegung, Gestaltung sowie Umsetzung der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft durch ein vollumfängliches Gesamtkonzept für die Umstellung kompletter Prozessketten auf kryogene Kühlung mit CO<sub>2</sub>
- Entwicklung kryogener Einzelprozesse / Prozessketten sowie deren Prozessfähigkeitsnachweis durch umfassende kryogene spanende Grundlagenuntersuchungen
- Verifizierung aller Lösungskonzepte in Laborumgebung
- Validierung aller Lösungskonzepte in Pilotumgebung
- Nachweis der Rückstandsfreiheit der Späne durch werkstofftechn. Analysemethoden
- Nachweisführung ökologischer (Energiebilanz, Ressourceneinsparung, CO<sub>2</sub>-Ausstoß) sowie ökonomischer (Fertigungszeiten sowie -kosten) Effekte

Konkrete zu erwartende Effekte hinsichtlich verbesserter Rohstoff-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Effizienz aber auch Kostenreduktionen sind nachfolgend als zentrale Forschungsfragen dargestellt.

Je nach Legierungsspezifik kann die neue Legierung aus 30% bis 70% recycelter Späne hergestellt werden, was direkt dem eingesparten Grund-Rohstoff entspricht. Zur präzisen Einstellung der Legierungsbestandteile und reproduzierbaren Steuerung des schmelzmetallurgischen Prozesses ist immer ein Grundbestandteil reiner Legierungsbestandteile erforderlich. Insbesondere die im Projekt zu betrachtenden Werkstoff Tribaloy™ alloy T-400 sowie Stellite™ alloy 6 bestehen aus 60 bis 65% Kobalt, sodass dieser Anteil direkt proportional um 30% bis 70% gesenkt werden kann. Die Nachweisführung dieser **rohstoffeffizienten Kreislaufwirtschaft** ist somit eine zentrale Forschungsfrage dieses Vorhabens.

Die **Energieeffizienz** der gesamten Prozesskette kann in Summe ebenfalls verbessert werden. Die Wiederverwendung von Spänen in schmelzmetallurgischen Prozessen erfordert grundsätzlich einen leicht erhöhten Energieeinsatz im Vergleich zu Stückgut. Dies ist insbesondere begründet durch Abbrandverluste, örtliche spezifische Energieverbräuche, Konsistenz und Schüttdichte der Späne. Aufgrund der hohen Einsparrate von neuen Rohstoffen (30-70%) ist in Summe von einer deutlichen Reduktion der Gesamtenergiebilanz - inkl. Minenabbau, Erzaufbereitung, Stückgutherstellung - auszugehen. Weiterhin werden energie-, wartungs- und damit kostenintensive konventionelle Kühlmittel und -anlagen eingespart. Eine Reduktion und Nachweisführung der gesamtheitlichen Energiebilanz ist ebenfalls zentrale Forschungsfrage dieses Vorhabens.

Im gleichen Maße wie die Betrachtung der Energiebilanz soll auch die **CO<sub>2</sub>-Bilanz** verbessert werden. Das beim Kühleinsatz verwendete CO<sub>2</sub> ist ein Restprodukt aus anderen industriellen Quellen (z.B. Chemieindustrie), sodass kein neues CO<sub>2</sub> emittiert, sondern vorhandenes CO<sub>2</sub> erneut wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt wird. Somit wird direkt kein weiteres CO<sub>2</sub> produziert. Zusätzlich ermöglicht die hohe Einsparrate von neuen Rohstoffen (30-70%) in Summe eine deutliche Reduktion der gesamten CO<sub>2</sub>-Bilanz (inkl. Minenabbau, Erzaufbereitung, Stückgutherstellung). Die positive Energiebilanz führt zusätzlich zu einer weiteren Reduktion der CO<sub>2</sub>-Bilanz infolge geringerer Stromverbräuche. Diese Reduktion und Nachweisführung der gesamtheitlichen CO<sub>2</sub>-Bilanz ist ebenfalls zentrale Forschungsfrage dieses Vorhabens.

Bauteile mit derartig hohen Anteilen an seltenen sowie kostenintensiven Werkstoffen wie Kobalt oder Nickel weisen bezugnehmend auf die Herstellkosten bauteilspezifisch bis zu 50% Materialkosten auf (interne Kalkulation Deloro Wear Solutions GmbH). Durch die Wiederverwendung der Späne mit einer Einsparrate neuer Rohstoffe von 30-70% würde dieser Kostenanteil direkt proportional verringert. Allein bei den Werkstoffen Tribaloy T-400 sowie T-800, was ca. 1/3 des Werkstoff-Volumens der Deloro Wear Solutions GmbH ausmacht, führt der Verkauf anstelle einer Wiederverwertung dieser Späne (ca. 8,4t pro Jahr) zu einem jährlichen Verlust von 160T€. Logistische Mehraufwände (Transport, Lagerung der Späne) sowie leicht erhöhte Energieverbräuche beim Schmelzen stehen dem entgegen. Durch den Einsatz kryogener CO<sub>2</sub>-Kühlung kann basierend auf bisherigen Erfahrungen auch mit einer Reduktion der Fertigungszeiten, Erhöhung der Werkzeugstandzeiten und somit weiteren Verringerung der Fertigungskosten ausgegangen werden. In Summe wird eine **Kostenreduktion** der Bauteile von 10-20% angestrebt. Insbesondere in Branchen mit geringer Gewinnbeteiligung wie der Automobilindustrie ist dies ein enormer Wettbewerbsvorteil. Diese Kostenreduktion und deren Nachweisführung ist ebenfalls zentrale Forschungsfrage dieses Vorhabens.

## 5 Ausführliche Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

### 5.1 Übersicht, Teilaufgaben und Lösungsweg

Der KMU-Partner acp Systems AG leitete das Vorhaben als Verbundkoordinator. Durch langjährige Erfahrung aus geförderten Projekten, einer hohen Expertise sowie Netzwerk-Kontakten auf dem Gebiet kryogener Technologien, sowie dem Streben nach der Erschließung neuer Märkte durch den Einsatz kryogener Technologien im Bereich der Metallzerspanung zeichnet sich acp besonders als Verbundkoordinator aus.

Das Verbundvorhaben war in 4 Teilvorhaben A bis D gegliedert. Dies entspricht gleichermaßen den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 4. Jeder Partner war dabei für ein AP verantwortlich. acp war hauptverantwortlich für AP 1. Auch an der Abarbeitung der anderen Arbeitspakte war die acp beteiligt. Daher sind in den folgenden ausführlichen Beschreibungen der durchgeführten Arbeiten die Anteile und Aufwände je AP seitens acp hervorgehoben und werden hauptsächlich thematisiert. Dies gilt analog auch für die wesentlichen Ergebnisse.

Das Verbundvorhaben war in 4 Teilvorhaben A bis D gegliedert. Dies entspricht gleichermaßen den Arbeitspaketen (AP) 1 bis 4.

- AP1 / Teilvorhaben A: Entwicklung einer CO2-Anlagentechnik
- AP2 / Teilvorhaben B: Gestaltung der Kreislaufwirtschaft
- AP3 / Teilvorhaben C: Prozesstechnologische Grundlagenuntersuchungen
- AP4 / Teilvorhaben D: Validierung in einer Pilotumgebung

Wie in Abbildung 1 ersichtlich sollte die unterbrochene Kreislaufwirtschaft durch die Umstellung der spanenden Fertigungsprozesse auf kryogene Kühlung hergestellt und somit eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft geschaffen werden.

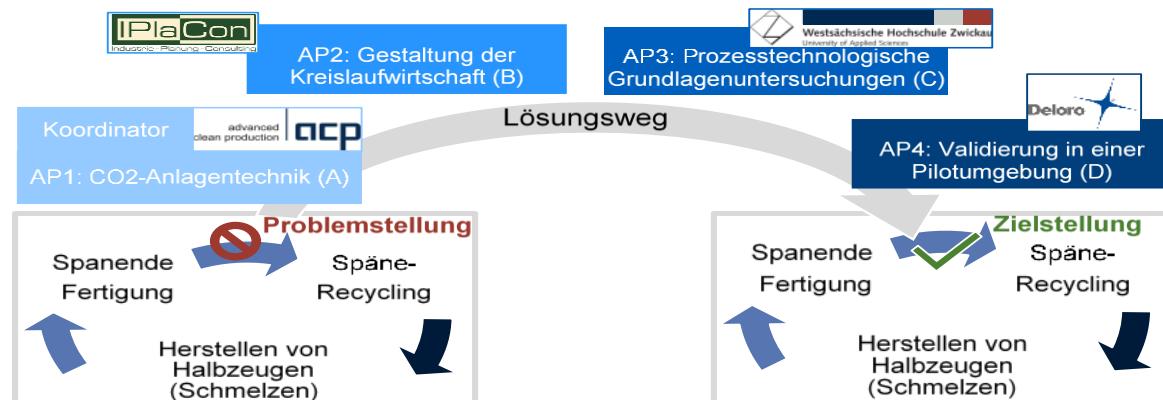


Abbildung 1: Verbundstruktur zur Lösung des Defizits (links) und Erreichung der Zielstellung (rechts)

Nachfolgende **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die geplanten tatsächlichen Aufwände der acp für die Bearbeitung des Verbundvorhabens, unter ökonomisch sinnvollem Einsatz von Ressourcen.

Nachfolgend sind die einzelnen 4 AP inkl. Ziel aufgelistet. Jeder Partner war dabei für ein AP verantwortlich, wobei einzelne Arbeitsschritte innerhalb der AP kooperativ zwischen den Partnern abgearbeitet wurden.

AP 1 Entwicklung einer CO2-Anlagentechnik (Teilvorhaben A)				
Kooperationspartner	ACP	IPlaCon	WHZ	Deloro
Leiter AP	X			
Ziel	- Entwicklung, Auslegung, Konstruktion, Optimierung, Herstellung sowie Verifizierung einer nachrüstbaren und maschinen-integrierten CO2-Anlagentechnik			

Die **acp systems AG** war hauptsächlich für die Entwicklung, Auslegung, Konstruktion, Herstellung sowie Transfer einer nachrüstbaren und maschinen-integrierten **CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik** verantwortlich. Dies beinhaltet einheitliche externe Schnittstellen zur Maschine, die Weiterleitung innerhalb der Maschine, die Konzipierung einheitlicher Schnittstellen zur Werkzeugaufnahme sowie die gezielte Parametereinstellung des CO<sub>2</sub>-Mediums. Als Verbundkoordinator obliegt acp auch das Projektmanagement und die Organisation des Gesamtverbundes.

<b>AP 2 Gestaltung der Kreislaufwirtschaft (Teilvorhaben B)</b>				
Kooperationspartner	ACP	IPlaCon	WHZ	Deloro
Leiter AP		X		
Ziel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vollumfängliche allgemeingültige Umsetzungskonzepte</li> <li>- adaptierte Umsetzungskonzepte für die Labor- sowie Pilotumgebung</li> <li>- Nachweisführung der ökologischen sowie ökonomischen Effekte</li> </ul>			

Die **IPlaCon GmbH** war hauptsächlich für die Entwicklung, Auslegung, Gestaltung sowie Umsetzung der **ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft** verantwortlich, was in einem vollumfänglichen Gesamtkonzept für die Umstellung kompletter Prozessketten auf kryogene Kühlung mit CO<sub>2</sub> resultiert. Dies beinhaltete die konzeptionelle Auslegung einer zentralen CO<sub>2</sub>-Peripherie (Medienversorgung und -bereitstellung, Arbeits- sowie Prozesssicherheitsaspekte, Risikobewertungen sowie Gefährdungsanalysen), die Anpassung der Fertigungsprozesse auf einzelprozesstechnischer sowie fabrikplanerischen Ebene sowie die Neugestaltung von Logistikketten sowie Materialflussplänen. Zusätzlich wurde der neue Ansatz der Kreislaufwirtschaft basierend auf ökologischen (Energiebilanz, Ressourceneinsparung, CO<sub>2</sub>-Ausstoß) sowie ökonomischen (Fertigungszeiten sowie -kosten) Kennzahlen bewertet.

<b>AP 3 Prozesstechnologische Grundlagenuntersuchungen (Teilvorhaben C)</b>				
Kooperationspartner	ACP	IPlaCon	WHZ	Deloro
Leiter AP			X	

Die Forschungsgruppe Spanungstechnologien der **Westsächsischen Hochschule Zwickau** unter der Leitung von Prof. Dr. sc. techn. Michael Schneeweiß war hauptsächlich für die **prozesstechnologischen Grundlagenuntersuchungen** verantwortlich. Dies umfasste die Entwicklung kryogener Einzelprozesse sowie Prozessketten aus fertigungstechnologischer Sicht, umfassende kryogene spanende Grundlagenuntersuchungen, die Optimierung der untersuchten Fertigungsverfahren hinsichtlich ökologischer (Reduktion CO<sub>2</sub>-Verbrauch als Kühlmedium) sowie ökonomischer (hohe Werkzeugstandzeiten, geringe Fertigungszeiten und -kosten) Kennzahlen sowie die Anwendung werkstofftechnischer Analysemethoden zur Bewertung der Spänequalität. Zusätzlich wurden die Neuentwicklungen der anderen Kooperationspartner in einer Laborumgebung verifiziert.

<b>AP 4 Validierung in einer Pilotumgebung (Teilvorhaben D)</b>				
Kooperationspartner	ACP	IPlaCon	WHZ	Deloro
Leiter AP				X
Ziel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validierung der technologischen Grundlagen der anlagentechnischen Prototypen, konzeptionell-strukturellen Konzepte sowie Prozesstechnologien</li> <li>- Nachweis der Steigerung der Ressourceneffizienz im Rahmen der Kreislaufwirtschaft</li> </ul>			

Die **Deloro Wear Solutions GmbH** war hauptsächlich für die **Validierung** der Lösungskonzepte der anderen Kooperationspartner in einer **Pilotumgebung** verantwortlich. Zusätzlich wurden entscheidende Entwicklungselemente bei der Gestaltung der Kreislaufwirtschaft (Prozessvorgaben, Adaption des universellen Umsetzungskonzeptes auf die Fertigungsgegebenheiten der Deloro Wear Solutions GmbH) in Abstimmung mit der IPlaCon GmbH konzipiert sowie der neue Ansatz basierend auf ökologischen (Energiebilanz, Ressourceneinsparung, CO<sub>2</sub>-Ausstoß) sowie ökonomischen (Fertigungszeiten sowie -kosten) Kennzahlen bewertet.

Darüber hinaus wurde in enger Abstimmung mit **allen Kooperationspartnern** kooperativ sowie interdisziplinär zusammengearbeitet. Dies ist erforderlich, da die Lösungskonzepte aller Kooperationspartner insbesondere in der Entwicklungsphase starken inhaltlichen Vernetzungscharakter besitzen und während der finalen Verifizierung und Validierung im gemeinschaftlichen Zusammenspiel erprobt sowie optimiert werden mussten.

## 5.2 Balkenplan

In der darauffolgenden Abbildung 2 Balkenplan sind zusätzlich zu den Arbeitspaketen die Arbeitsschritte dargestellt. Somit sind die Aufwände, die unter ökonomisch sinnvollem Einsatz von Ressourcen für die Bearbeitung des Verbundvorhabens notwendig sind, plausibel dargestellt. Der Balkenplan entspricht zeitlich und inhaltlich exakt dem Projektumfang. Die aufgrund der notwendigen kostenneutralen Projektverlängerung entstandenen Mehrbedarfe sind bereits inbegriffen. Eine genaue zeitliche Auflistung sowie Zuordnung der personellen Ressourcen sowie Meilensteine sind der Abbildung 2 „Balkenplan“ zu entnehmen. Wichtige Meilensteine sind in Tabelle 4 in Kapitel 2.4 dargestellt.

Die ausführliche Darstellung und Beschreibung der Arbeitsinhalte, Vorgehensweise, wesentliche Projektergebnisse und auch Mehrbedarfe (Gründe für kostenneutrale Projektverlängerung) des Projektpartners acp, erfolgt unter 2.3.

Sachbericht zu Verwendungsnachweis Teil 2 eingehende Darstellung  
 KMU-innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz: CryoEfficiency

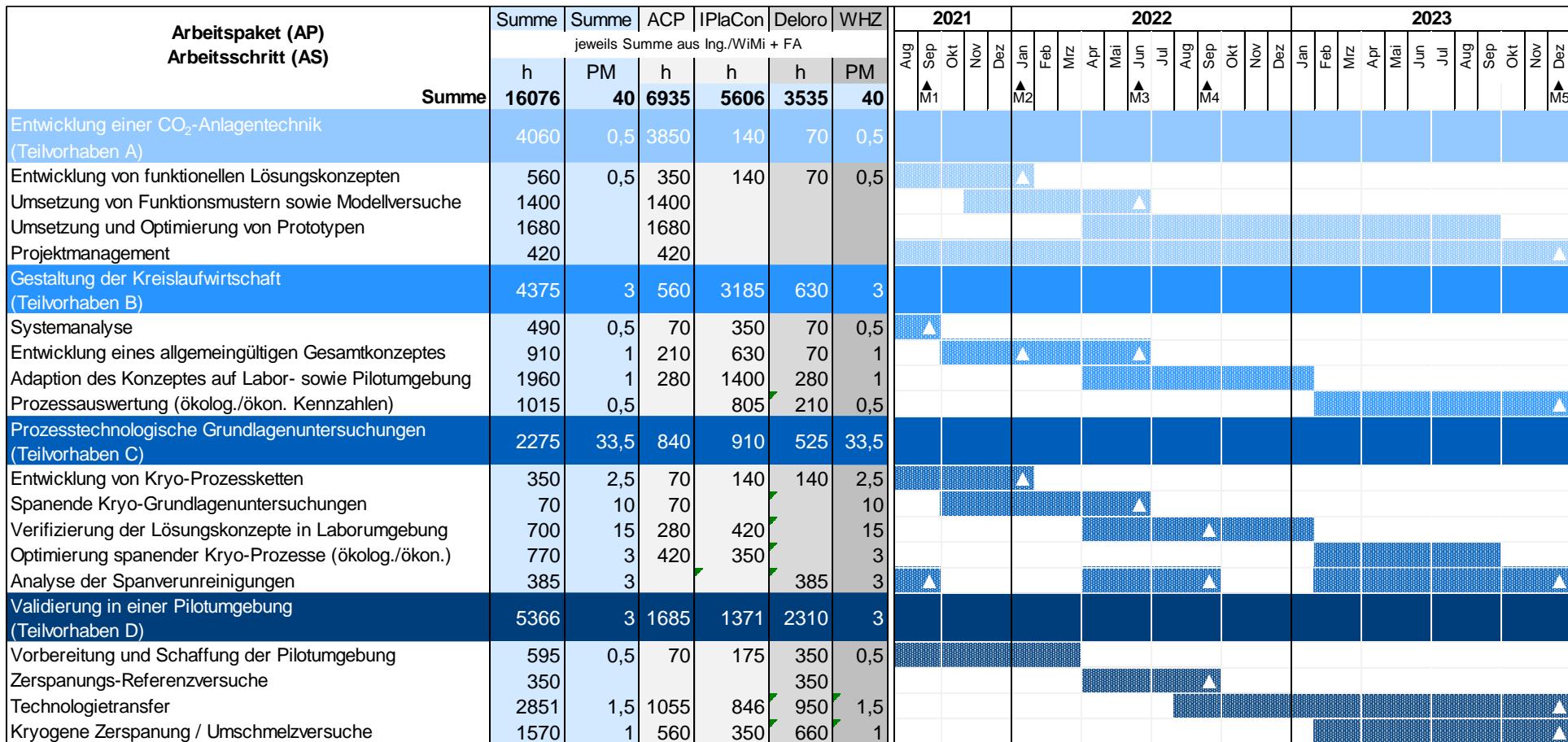


Abbildung 2: Balkenplan - zeitliche und personelle Übersicht tatsächlich

### 5.3 durchgeführte Arbeiten Projektpartner acp systems AG

Die nachfolgend beschriebenen Arbeiten betreffen nur die Arbeitsschritte der Arbeitspakete AP1-AP4, an denen die acp direkt beteiligt oder verantwortlich war, deren Inhalt und Ergebnisse.

#### 5.3.1 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP1

Zur Entwicklung der anlagentechn. Lösungskonzepte wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein Anforderungskatalog erstellt, in dem alle notwendigen Anforderungen (organisatorische, technisch wirtschaftliche) erfasst und gewichtet wurden. Auf Basis der von den Projektpartnern vorgegebenen technischen Anforderungen vor allem bzgl. Funktionalität, Schnittstellen, Qualität, und Sicherheit definiert und gewichtet.

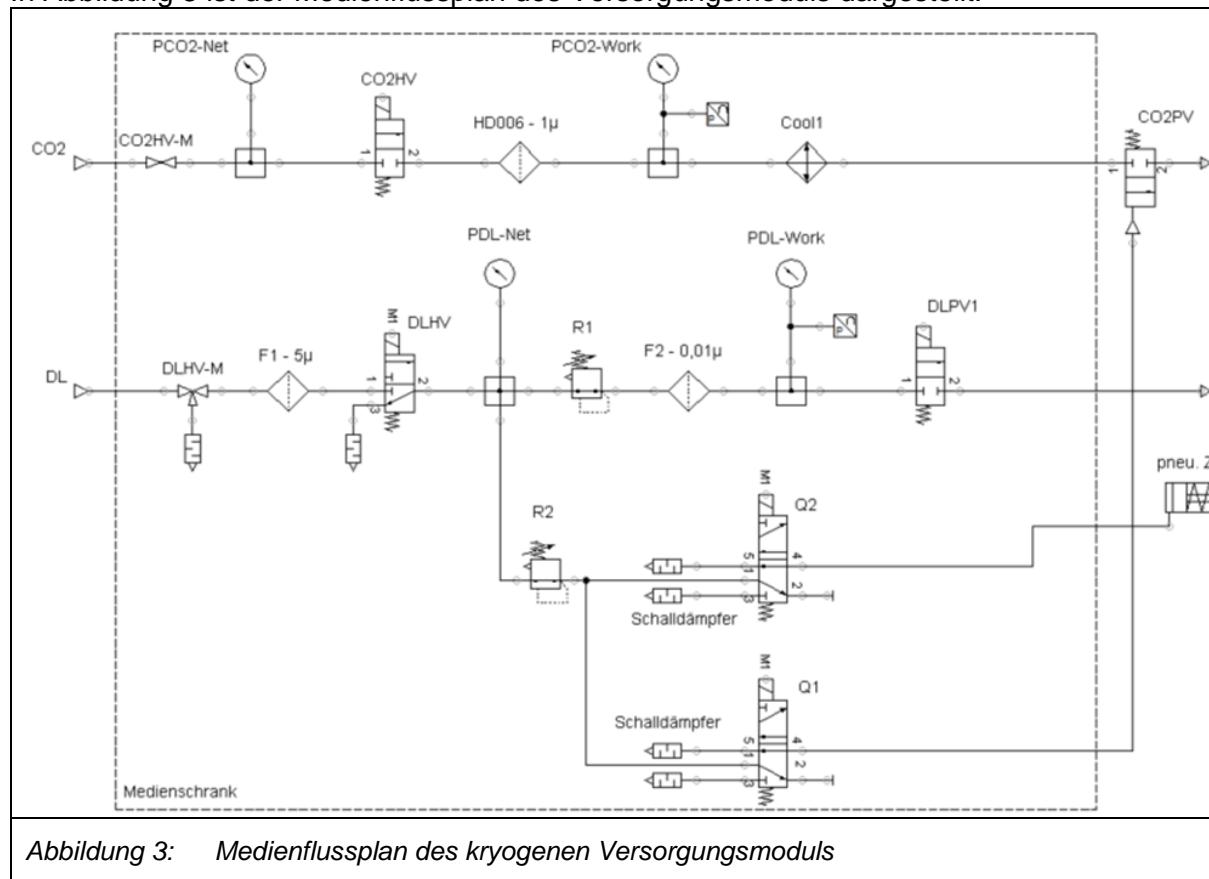
Die Entwicklung der anlagentechnischen Lösung erfolgte basierend auf diesem Anforderungskatalog.

Im Rahmen der Vor-Auslegung/Projektierung der Gesamtanlage sowie von Einzelkomponenten wurden die benötigten CO<sub>2</sub>-Durchflussmengen berechnet, sowie die Leitungs- und Düsen-durchmesser strömungsgünstig passend ausgelegt. Auf dieser Grundlage wurden Einzelkomponenten (Leitungen, Ventile, etc.) ausgewählt.

Weiterhin wurde die neuartige mechanische sowie die einheitliche elektrische Schnittstelle zur Zerspanungsmaschine entwickelt. Zur entwickelten Gesamtlösung gehören auch die verlustarme Weiterleitung des CO<sub>2</sub> innerhalb der Maschine und einheitliche Schnittstellen zur Werkzeugaufnahme.

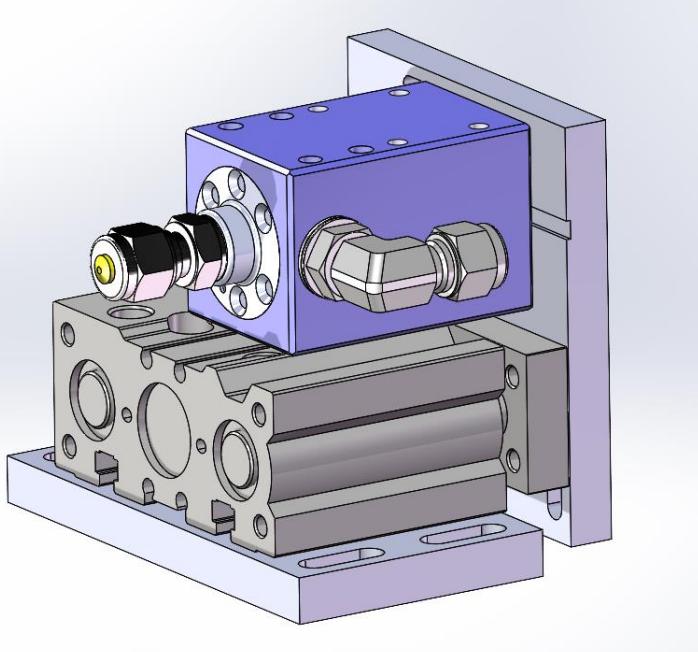
Das Lösungskonzept zur gezielten Parametereinstellung des CO<sub>2</sub>-Mediums passend zum jeweiligen Werkzeug und den Schnittparametern bei unterschiedlichen Fertigungsschritten wurde zweistufig umgesetzt. Die Grobeinstellung erfolgt mittels eines durchflussbegrenzenden Kapillarrohrs, das spezifisch in die jeweiligen Werkzeughalter eingeschraubt wird. Die Feinparametrisierung erfolgt mittels Pulsweitenmodulation über ein eigens entwickeltes Taktventil.

In Abbildung 3 ist der Medienflussplan des Versorgungsmoduls dargestellt.



Das in AP 1.1 erarbeitete Anlagenkonzept bzw. die Einzelkomponenten wurden konstruiert und detailliert. Für alle Fertigungsteile wurden Zeichnungen abgeleitet.

Insbesondere für die Schnittstellen Werkzeugrevolver und zu den Werkzeughaltern wurden Funktionsmuster für Modellversuche zur Validierung von Dichtigkeit, Lebensdauer und konstanter Kühlleistung hergestellt. Die entsprechenden experimentellen Untersuchungen wurden in eigener Laborumgebung durchgeführt.

	
<p><i>Abbildung 4: Baugruppe mit Taktventil zur CO2-Dosierung, Ausrückzylinder und Dichtung (gelb) an der Übergabestelle zum Werkzeugrevolver.</i></p>	<p><i>Abbildung 5: Laboraufbau für den Lebensdauertest der Dichtung.</i></p>

Anhand der Versuchsergebnisse erfolgte die systematische Ableitung von Defiziten.

Bei der Abdichtung der Durchführung am Werkzeugrevolver wurden in den Versuchen Defizite festgestellt. Das Konzept der Abdichtung zum Werkzeugwechsler wurde iterativ optimiert, bis eine zuverlässige Lösung mit geringer Komplexität, die alle Anforderungen erfüllt, gefunden war.

Im nächsten Schritt wurden Prototypen aller Komponenten hergestellt und montiert.

Mit dieser Anlage erfolgten erneute experimentelle Untersuchung von Grundfunktionalität, Prozessteuerung und -regelung, Leckage, Durchflussmenge und gleichmäßiger Strömungsqualität beim Austritt. Weitere Detailoptimierungen stellen sicher, dass alle Punkte zur vollen Zufriedenheit entsprechend des Anforderungskatalogs erfüllt sind.

Nach Abschluss der Laborversuche wurde der Prototyp zur Verifizierung unter produktionsnahen Bedingungen (AP3.3 zur WHZ verlagert). Transfer der Prototypen zur WHZ und vor-Ort-Verifizierung.

Es folgte die Vor-Ort-Optimierung der Prototypen der Düsen in den Werkzeugaufnahmen im realen Zerspanprozess. Basierend auf diesen Erfahrungen wurde die Austauschbarkeit der durchflussbegrenzenden Kapillarbaugruppe auf eine schnelle und unkomplizierbare Austauschbarkeit hin optimiert.

In diesem Arbeitspaket erfolgte die Strukturierung der Arbeitspakete sowie die Organisation der inhaltlichen Abstimmung zwischen den Projektpartnern. Zu diesem Zweck erfolgten 14-tägige Online-Meetings unter Beteiligung aller Projektpartner. Die Inhalte wurden in einem OneNote-Dokument protokolliert. Zum Datenaustausch zwischen den Projektpartnern wurde ein Austauschlaufwerk eingerichtet. Der aktuelle Stand der Arbeiten wurden regelmäßig mit der Planung verglichen sowie entsprechende Prioritäten und Ziele vereinbart. Ergänzt wurden die Online-Besprechungen durch mehrere Vor-Ort-Projekttreffen beiwechselnden Projektpartnern. Die erfolgreiche Erfüllung der Kriterien der Meilensteine wurde kontrolliert.

### **5.3.2 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP2**

Gemeinsam mit den Projektpartnern erfolgte die Analyse der Fertigungsbedingungen vor Ort bei Deloro in Koblenz bzgl. Softwarevoraussetzungen, Logistikstrukturen, Materialflüssen, maschinellen Voraussetzungen, aktueller Prozessketten und Einzel-Prozesse, Technologiedaten, Werkstoffe sowie Bauteilgrößen. Zusammen mit dem Projektpartner Deloro wurden Typenvertreter hinsichtlich geeigneter Prozesse/Werkstoffe für die in AP3 (AP3.2) und AP4, (AP4.2, AP4.4) geplanten Spanungsversuche in der Labor- und Pilotumgebung ausgewählt und festgelegt.

Aus der Systemanalyse bei Projektpartner Deloro wurden im Hinblick auf technische, wissenschaftliche sowie wirtschaftlichen Zielkriterien Prioritäten festgelegt, bspw. werkstoffseitig auf die Co-Basislegierung TRIBALOY T400, bauteilseitig auf die hinsichtlich Stückzahlen 5 wichtigsten Bauteile sowie prozessseitig auf mehrere markante grundlegend verschiedene Drehprozesse, die im weiteren Projektverlauf von grundlegender Bedeutung sind.

Im Zuge der Systemanalyse wurden techn., mechanischen, softwaretechnische, technologische Schnittstellen/Anforderungen für die Entwicklungskonzepte gemeinsam mit den Projektpartnern exakt definiert und im Anforderungskatalog festgehalten.

Aufgrund der vorhandenen Expertise hinsichtlich Einsatz kryogener Kühlung mit CO<sub>2</sub> in der Zerspanung unterstützte die acp den Projektpartner IPlaCon bei der Entwicklung eines allgemeingültigen Gesamtkonzeptes sowie allgemeingültiger Einzelkonzepte hinsichtlich der Auslegung einer zentralen CO<sub>2</sub>-Peripherie (Medienversorgung und -bereitstellung); bei der Erarbeitung von Arbeits- sowie Prozesssicherheitskonzepten sowie bei Risikobewertungen, Gefährdungsanalysen. Grundlage dafür sind die bereits umfangreichen Vorkenntnisse aus vergangenen Projektarbeiten mit vorhandener kryogener Reinigungstechnik sowie Sicherheitstechnik. Die vorhandenen Kenntnisse, Ausrüstungsequipment und Dokumentationen waren essentiell für die Entwicklung des Gesamtkonzeptes.

Bei der Adaption bzw. Anwendung der allgemeingültigen Konzepte auf Laborumgebung (WHZ) durch IPlaCon wurden unterstützende Arbeiten von acp durchgeführt hinsichtlich der Durchführung konkreter Risikobewertungen und Gefährdungsanalysen.

- Vor-Ort-Arbeiten im Laborbereich und vorbereitende Arbeiten zur Implementierung der CO<sub>2</sub>-Peripherie wie Vorbereitungsarbeiten außerhalb eines BAZ für die Installation der CO<sub>2</sub>-Anlagenstechnik (speziell im Bereich Sicherheitstechnik).



Abbildung 6: redundante CO<sub>2</sub>-Gaswarnsensoren/Sicherheitstechnik

### 5.3.3 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP3

Bei der Entwicklung von Kryo-Prozessketten wurden unterstützende Arbeiten von acp durchgeführt hinsichtlich:

- Entwicklung kryogener Einzelprozesse/Prozessketten aus fertigungstechnologischer Sicht
- Definition von kryogenen Prototypenwerkzeugen zur Beschaffung durch externen Zulieferer
- Abstimmung der Entwicklungsschwerpunkte sowie -ziele mit dem Zulieferer der Prototypenwerkzeuge (Einheitlichkeit der Anschlüsse, Übergabestellen)

Bei der Entwicklung von Kryo-Prozessketten wurden unterstützende Arbeiten von acp durchgeführt hinsichtlich:

- Integration vorhandener einfacher kryogener Laborausrüstung
- Erweiterung der Laborausrüstung durch Düsen und Anschluss- sowie einfacher Steuer- und Regelungstechnik
- Installation von Sicherheitstechnik (nicht industriefähig) in das ausgewählte BAZ im Laborbereich der WHZ



Abbildung 7: Grundlagenuntersuchungen mit kryogener Laborausrüstung

- Aufbau und Inbetriebnahme der CO<sub>2</sub>-anlagentechnischen Prototypen sowie Anwendung der CO<sub>2</sub>-Umsetzungskonzepte inkl. notwendiger Sicherheitstechnik in der Laborumgebung der WHZ (mechanisch, infrastrukturell, steuerungs- und Regelungstechnisch, sicherheitstechnisch, fabrikplanerisch). Dazu gehören die Installation der CO<sub>2</sub>- und Druckluftversorgung, die Verschlauchung und Verkabelung sowie umfangreiche Tests der Anlagen- und Sicherheitstechnik.

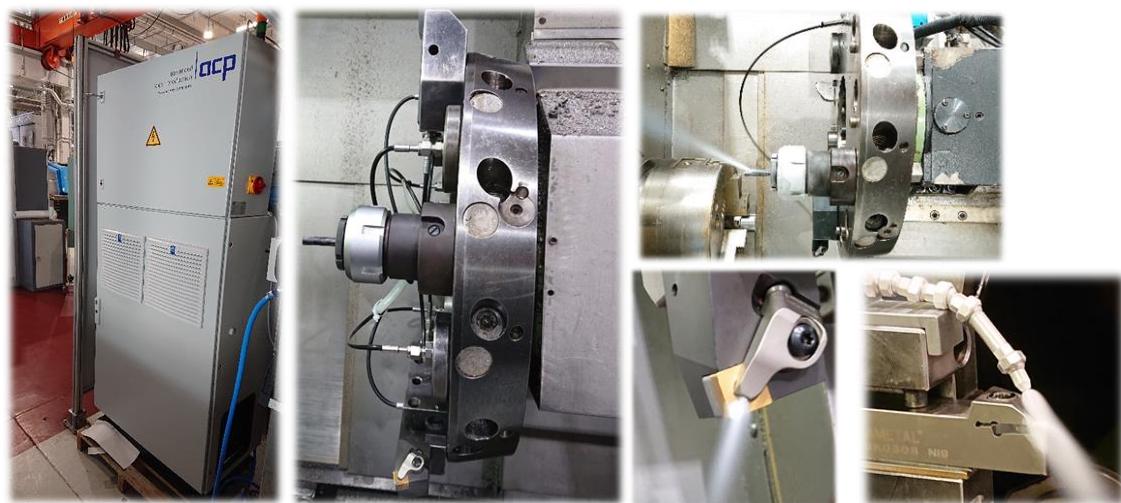


Abbildung 6: CO<sub>2</sub>-Anlage, Installation Leitungen und Adapter, Inbetriebnahme CO<sub>2</sub>-Werkzeuge

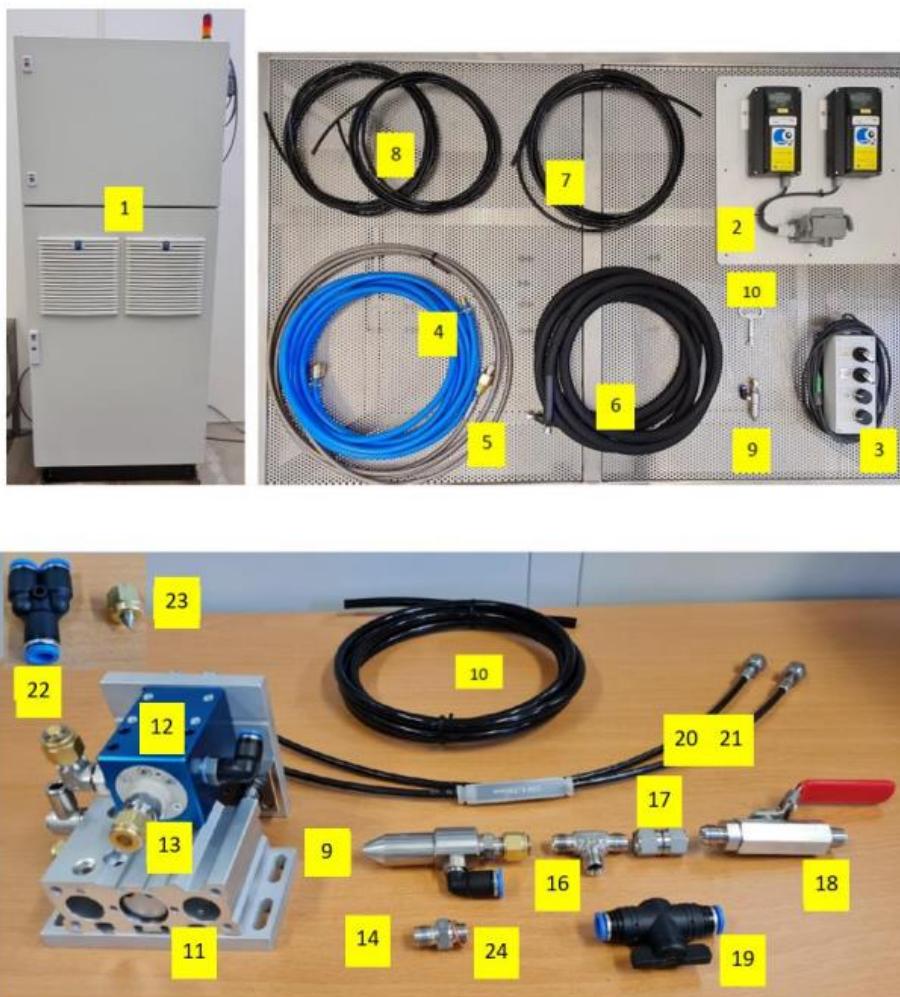


Abbildung 7: Auszug CO<sub>2</sub>-Equipment für Erstumrüstung BAZ in Laborumgebung

- Optimierung der Anlagensoftware unter Berücksichtigung erster Erkenntnisse aus dem Praxiseinsatz mit dem Ziel, den Regelbereich zu maximieren.
- Ableitung von Optimierungsansätzen und deren Umsetzung bis zur Verifizierung der geforderten funktionalen / nicht-funktionalen Spezifikationen lt. Anforderungskatalog (acpjkl), siehe auch AP1.3.

Die in AP 1.3 entwickelten Optimierungsansätze wurden vor Ort implementiert und im Praxiseinsatz erfolgreich getestet.

Anschließend erfolgte die Optimierung der kryogenen Zerspanungsprozesse beim Drehen, Fräsen, Bohren sowie Gewinden in Abhängigkeit von Werkstoff, den Prozessparametern und den Kühlparametern hinsichtlich ökonomischer (Fertigungszeiten/-kosten), ökologischer (Reduktion CO<sub>2</sub>-Verbrauch), qualitativer (Werkstückoberflächen), werkstofftechnischer (Rückstandsfreiheit der Späne) Kriterien. Dazu wurden für jedes Werkzeug und für jeden Zerspanungsschritt die optimalen durchflussbegrenzenden Kapillardurchmesser sowie die optimale Einstellung des Taktverhältnis des Steuerventils ermittelt. Ausgehend vom nicht optimierten Prozess wurde eine deutliche Reduktion des CO<sub>2</sub>-Verbrauchs ohne negative Auswirkung auf Fertigungszeit und Oberflächenqualität erreicht.

#### 5.3.4 durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse in AP4

Unter Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten bei Deloro wurde ein Anlagenlayout entwickelt, das die Bearbeitungsmaschine, das kryogene Versorgungsmodul sowie die CO<sub>2</sub>-Versorgung über Flaschenbündel enthält. Positionen und Abstände wurden unter Berücksichtigung von ergonomischen, arbeitsökonomischen und Sicherheitsaspekten festgelegt. Die benötigten Leitungslängen zwischen den einzelnen Anlagenkomponenten wurden ermittelt. Außerdem wurde ein Sicherheitskonzept für den Einsatz in industrieller Umgebung erstellt.

In enger Abstimmung zwischen acp und Deloro erfolgte die Abstimmung der Einbindung der kryogenen Kühlwanlage mit dem Bearbeitungszentrum. Die soft- und hardwareseitige Anbindung wurde durch acp realisiert. Zusätzlich zum Automatikbetrieb mit Ansteuerung durch das Bearbeitungszentrum wurde ein manueller Betriebsmodus implementiert, in dem das Kühlmodul für Tests unabhängig vom Bearbeitungszentrum über das Bedienpanel angesteuert wird.

Der Prototyp wurde vom WHZ zu Deloro transferiert (siehe Abb. ) sowie die erarbeiteten Konzepte, Technologien und Prozessparameter übertragen.



Abbildung 8: CO<sub>2</sub>-Anlage und CO<sub>2</sub>-Flaschenbündel in der Pilotumgebung

Anschließend erfolgte die Integration der Systeme in Pilotumgebung (mechanisch, infrastrukturell, steuerungs- und Regelungstechnisch, sicherheitstechnisch, fabrikplanerisch)

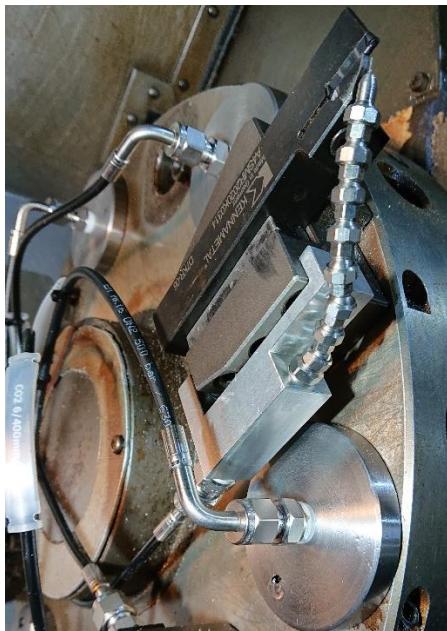


Abbildung 11: installierte CO<sub>2</sub>-Zuführtechnik am Revolver

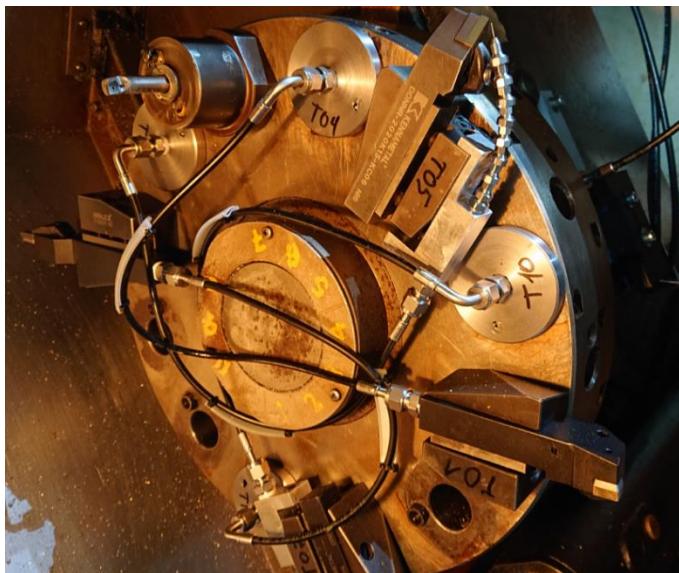


Abbildung 9: Komplett bestückter Werkzeugrevolver mit kryogener Kühlzuführung  
Abbildung 13: Musterbauteile gedreht



Die kryogene Anlagentechnik wurde in der industriellen Pilotumgebung in Betrieb genommen. Zunächst erfolgten Tests der Einzelbaugruppen. Die Hubvorrichtung zum Auskoppeln der CO<sub>2</sub>-Versorgung wurde auf die spezifischen Einbauverhältnisse des Bearbeitungszentrums angepasst. Mit diesen Anpassungen konnten Funktion, Selbstreinigungseffekt und Dichtigkeit auch im rauen industriellen Umfeld nachgewiesen werden. In enger Zusammenarbeit zwischen acp und Deloro erfolgte die hard- und softwaremäßige Kopplung von Bearbeitungszentrum und Kühlmodul über die definierte Schnittstelle, sowie die Einbindung in den Sicherheitskreis. Mit den abschließenden erfolgreichen Tests der Gesamtanlage wurde die Anlage für den Betrieb im seriennahen Umfeld freigegeben. Es folgten umfangreiche Zerspanversuche, die durch acp begleitet wurden. Für einzelne Bearbeitungsoperationen wurde die CO<sub>2</sub>-Zufuhr

zur Werkzeugschneide optimiert. Für die Operation Abstechen wurde zusätzlich ein Außenkühladapter aufgebaut. Die Ergebnisse der Zerspan- und Umschmelzversuche sind im Bericht von Deloro ausführlich dargestellt.

## 5.4 Meilensteinplanung

Die nachfolgenden Meilensteine dienten der Qualitätskontrolle des FuE-Vorhabens sowie der Erreichung von Forschungsschwerpunkten.

Tabelle 1: Meilensteine des Forschungsvorhabens

M.-stein	Beschreibung	Zeitpunkt
M1	<b>Vollumfänglicher Anforderungskatalog</b> Inhalt ist die Analyse sowie Aufnahme aller Anforderungen als Entwicklungsgrundlagen für anlagentechnische, konzeptionell-strukturelle sowie prozesstechnologische Lösungskonzepte	09/2021
M2	<b>Entwürfe der Lösungskonzepte</b> Grundlage für die Finalisierung sowie Umsetzung der Lösungskonzepte	01/2022
M3	<b>Umgesetzte Lösungskonzepte</b> Alle anlagentechnischen, strukturellen sowie prozesstechnologischen Lösungskonzepte stehen in Form von Funktionsmustern für Verifizierungsversuche in der Laborumgebung (AP3.3) zur Verfügung	06/2022
M4	<b>Nachweis rückstandsfreier Späne sowie Wiederverwendbarkeit</b> In den Arbeitspaketen AP4.2 sowie AP3.3 finden spanende Referenz- sowie Kryo-Untersuchungen statt. Die produzierten, isolierten Späne werden im Rahmen des AP3.5 auf deren Rückstandsfreiheit analysiert.	09/2022
M5	<b>Erfolgreich verifizierte Lösungskonzepte in Laborumgebung</b> Die überführten anlagentechnischen, konzeptionell-strukturellen sowie prozesstechnologischen Lösungskonzepte werden in der Laborumgebung auf die im Anforderungskatalog definierten funktionalen und nicht-funktionalen Spezifikationen hin bewertet und bis zum finalen Funktionsnachweis hin optimiert	12/2023
<b>Endziel: Erfolgreiche Validierung sowie Nachweis der Steigerung der Ressourceneffizienz in Pilotumgebung</b>		

Alle Meilensteine konnten im Rahmen der Projektlaufzeit erreicht werden.

## 6 Verwertungsplan

### 6.1 Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die nachfolgenden Ausführungen zur wirtschaftlichen Verwertbarkeit der Ergebnisse beziehen sich auf den Projektpartner acp systems AG, die Sachberichte der anderen Partner enthalten entsprechende Angaben der jeweiligen Projektpartner.

Die Erkenntnisse, speziell aus AP1, AP3 und AP4 zur Entwicklung der kompletten kryogenen Anlagentechnik sowie deren Optimierung können projektübergreifend übertragen werden. Die sehr guten Projektergebnisse im Hinblick auf:

- gelungene Integration der kryogenen Anlagentechnik in bestehende BAZ
- Prozessübergreifende Eignung der kryogenen Kühlung bei grundsätzlich verschiedenen Zerspanungsoperationen und Schneidstoffvarianten
- Rückstandsfreie Komplettbearbeitung (saubere Bauteile und Späne)
- Nachweis der verbesserten Wirtschaftlichkeit durch Einsatz der kryogenen Kühlung
- Nachweis der verbesserten CO2-Bilanz bei Einsatz kryogener Kühlung gegenüber bisher eingesetzter KSS-Strategie

bilden die Basis für kommende Projekte und Einsatzmöglichkeiten der neuen Anlagentechnik.

Die entwickelte CO2-Anlagentechnik kann nun branchenübergreifend zur Ausrüstung spanender Fertigungen mit kryogener CO2-Kühltechnologie vermarktet werden. Bereits unmittelbar

nach Projektabschluss erfolgte die Umrüstung/Integration der kryogener Kühlanlagentechnik an einem weiteren BAZ (5-Achs-Fräszentrum) im Laborbereich der WHZ gemeinsam mit dem Projektpartner acp, wodurch nun an der WHZ sehr vielseitige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der kryogenen Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide gewährleistet sind. Aktuell ist im Rahmen des Projektes bei Deloro zunächst ein BAZ für den seriellen Einsatz der kryogenen Kühlung bei der Drehbearbeitung nachgerüstet worden und im Mehrschichtbetrieb einsetzbar. Eine weiteres baugleiches BAZ ist bei Bedarf ebenfalls analog nachrüstbar mit dem vorhandenen Kühlanlagenequipment und zeitnah einsetzbar.

Die entwickelte CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik inklusive der universellen internen und ex-ternen Schnittstellen, der technischen Komponenten sowie der Prozesssteuerung können von der acp systems AG branchenübergreifend zur Ausrüstung einer spanenden Fertigung mit kryogener CO<sub>2</sub>-Kühltechnologie verwendet werden. Zusätzlich können Einzelkomponenten und Einzeltechnologien auf das vorhandene Produktspektrum (CO<sub>2</sub>-Reinigungsanlagen) übertragen werden, zu technischen Verbesserungen führen und umsatzsteigernd vermarktet werden.

Der Kundenkreis erstreckt sich perspektivisch auf alle Firmen mit spanender Bearbeitung, bei denen schwer bearbeitbare Materialien (z.B. Nickel, Kobalt, Titan) vorkommen, bzw. von Bauteilen/Werkstoffen mit hohem Anforderungsprofil (Automobil-, Flugzeugindustrie, Medizin-, Bergbau-, Förder-, Pumpen-, Turbinentechnik) gefertigt werden. Außerdem ist die entwickelte CO<sub>2</sub>-Anlagentechnik überall dort einsetzbar, wo eine Trockenbearbeitung durch den Einsatz kryogener Kühlung mit CO<sub>2</sub> als ökonomisch, ökologisch oder gesundheitstechnisch sinnvoll eingeführt werden kann.

Es ergibt sich folgende Abschätzung der erwarteten Personal- und Umsatzentwicklung.

Tabelle 5: Personal- /Umsatzplanung ACP innerhalb der ersten 3 Jahre nach Projektende

Partner Typ projektbezogene Umsätze (pro Jahr)	ACP MU	
	Umsatz pro Projekt	Anz.
2024	4	100.000 €
2025	10	250.000 €
2026	15	375.000 €
Summe		725.000 €
zusätzl. Mitarbeiter		2

## 6.2 Wissenschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Während der Durchführung des Projektvorhabens ist den Zuwendungsempfängern kein Fortschritt, auf dem Gebiet des Vorhabens, von anderen Stellen bekannt gewordenen. Das Vorhaben selbst jedoch führte zu einem fundierten Prozessverständnis und erhöhte deutlich die wissenschaftliche Expertise aller Kooperationspartner.

Die wissenschaftliche Verwertung der Erkenntnisse ist aufgrund der universellen Anwendbarkeit der kryogenen Einzeltechnologien branchenoffen. Die Kooperation von ACP mit beteiligten Partnern wurde über den Projektzeitraum hinaus vertieft sowie auf weitere Fertigungsprozesse ausgeweitet, bspw. durch die Aufnahme/Beitritt in den Arbeitskreis "Zerspanen mit CO<sub>2</sub>" und der WHZ, einer zentralen Plattform, die den Austausch zwischen Industrie und Wissenschaft zur kryogenen Bearbeitung ermöglicht. Dadurch erfolgte ein projektübergreifender wissenschaftlicher sowie industrieller Wissenstransfer der grundlegenden Erkenntnisse. Derzeit erfolgen Abstimmungen zur Planung weiterer konkreter Projekte zur Implementierung der kryogenen Kühlung bei industriellen Unternehmen, in Zusammenarbeit mit der WHZ.

- Fachzeitschrift Diamond Business 1. Ausgabe (2024), S. 50-52  
*Effizientere Zerspanung schwer bearbeitbarer Legierungen auf Nickel- und Kobaltbasis*
- Fachzeitschrift DREHTEIL+DREHMASCHINE in 3. Ausgabe (2024)  
*Schneestrahltechnologie für die kryogene Kühlung schwer bearbeitbarer Werkstoffe  
Wirtschaftlicher, schneller und sauberer zerspanen*

## 7 Quellenverzeichnis

1. Statista. Entwicklung der weltweiten Rohstoffproduktion ausgewählter Metalle von 1993 bis 2013 | Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/586311/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-rohstoffproduktion-ausgewaehler-metalle/> (29 September 2020).
2. Zaman, H. A. *et al.* Machinability of Cobalt-based and Cobalt Chromium Molybdenum Alloys - A Review. *Procedia Manufacturing* **11**, 563–570 (2017).
3. Wang, F., Li, L., Liu, J. & Shu, Q. Research on tool wear of milling nickel-based superalloy in cryogenic. *Int J Adv Manuf Technol* **91**, 3877–3886 (2017).
4. Jawahir, I. S. *et al.* Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals* **65**, 713–736 (2016).
5. Bordin, A. *et al.* Feasibility of Cryogenic Cooling in Finishing Turning of Acetabular Cups Made of Additive Manufactured Ti6Al4V. *Procedia CIRP* **46**, 615–618 (2016).
6. Debnath, S., Reddy, M. M. & Yi, Q. S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining. A review. *Journal of Cleaner Production* **83**, 33–47 (2014).