

# BMUB-Umweltinnovationsprogramm

## Abschlussbericht

---

### zum Vorhaben

*„Anlage zur Bearbeitung hochfester metallischer Werkstoffe  
durch elektrochemischen Abtrag (PECM)“*

NKa3 - 003055

### Zuwendungsempfänger/-in

Mewatec Mechanische Werkstatt & Technologie e.K.

Reiersbacher Straße 35

77871 Renchen-Ulm

### Umweltbereich

(Wasser/Abwasser, Abfall, Ressourcen, Klimaschutz, Luft, Boden, Lärm)

### Laufzeit des Vorhabens

02.07.2015 bis 30.04.2016

### Autor/-en

Andreas Petzoldt

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und  
Reaktorsicherheit**

### Datum der Erstellung

16.06.2016

---

## Berichtsblatt

Aktenzeichen UBA: <b>NKa3 - 003055</b>	Projekt-Nr.: <b>NKa3 - 003055</b>
Titel des Vorhabens:  <b>„Anlage zur Bearbeitung hochfester metallischer Werkstoffe durch elektrochemischen Abtrag (PECM)“</b>	
Autor/-en (Name, Vorname)  <b>Andreas Petzold</b>	Vorhabensbeginn:  <b>02.07.2015</b>
	Vorhabensende (Abschlussdatum):  <b>30.04.2016</b>
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift):  <b>Mewatec Mechanische Werkstatt &amp; Technologie e.K.</b> <b>Reiersbacher Straße 35</b>  <b>77871 Renchen-Ulm</b>	Veröffentlichungsdatum:  <b>16.06.2016</b>
	Seitenzahl:  <b>27</b>
Gefördert im BMUB-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen):  <p>In den letzten Jahren werden verstärkt höher- und hochfeste Stähle entwickelt und eingesetzt. Die Werkzeuge bspw. beim Fräsen erreichen hierbei immer öfter ihre Grenzen und verschleifen vor-schnell. Weitere Nachteile sind prozessbedingt, da nur durch extrem hohen Aufwand bspw. parallel zwei oder mehr Löcher gebohrt werden können. Jedes Werkzeug benötigt eigene Spindeln, Antriebe und damit ein Vielfaches an Energie.</p> <p>Vereinzelt werden derzeit elektrochemisch-abtragende Systeme (ECM, PECM) spezifisch für die hoch-festen Werkstoffe eingesetzt. Diese erleben noch keinen flächendeckenden Durchbruch. Eine neuarti-ge Maschinengeneration ermöglicht es erstmals, Stückzahlen wie bei zerspanenden Verfahren zu er-halten, den Werkzeugverschleiß nahezu ersatzlos zu substituieren und so einen energetisch-hocheffizienten und wirtschaftlichen Prozess zu realisieren.</p> <p>Der Vorteil der neuartigen Technologie ist, dass die Anlage aus standardisierten Modulen besteht und hinsichtlich Prozessstabilität, Reproduzierbarkeit und verarbeitbarer Werkstoffvielfalt, den hohen An-forderungen der Automobilindustrie entspricht.</p> <p>Die Technologie wurde im Rahmen des Vorhabens in Deutschland erstmalig beim Antragsteller groß-technisch eingeführt.</p>	
Schlagwörter: <b>PECM, hochfeste metallische Werkstoffe, elektrochemischer Abtrag</b>	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: <b>6</b> Elektronischer Datenträger: <b>per E-Mail</b>	Sonstige Medien: Veröffentlichung im Internet Geplant auf der Webseite: <b>ja</b>

## Report Coversheet

Reference-No. Federal Environment Agency: <b>NKa3 - 003055</b>	Projekt-Nr.: <b>NKa3 - 003055</b>
Report Title:  <b>„Production plant to manufacture high tensile metallic materials by electrochemical discharge (PECM)“</b>	
Author/Authors (Family Name, First Name)  <b>Andreas Petzold</b>	Start of project:  <b>02.07.2015</b>
	End of project:  <b>30.04.2016</b>
Performing Organisation (Name, Address):  <b>Mewatec Mechanische Werkstatt &amp; Technologie e.K. Reiersbacher Straße 35  77871 Renchen-Ulm</b>	Publication Date:  <b>16.06.2016</b>
	No. Of Pages:  <b>27</b>
Funded in the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety.	
Summary (max. 1.500 characters):  In recent years high tensile metallic materials are increasingly being developed and used. The machining tools e.g. in milling are drawn to its limits and are wearing quickly. Other disadvantages are due to process. Every tool needs its own spindle and power unit causing multiple energy consumption. Rarely electrochemical discharge (ECM, PECM) is used for high tensile metallic materials resulting in a low leverage of this technology. Due to a new machine-generation it is now possible to achieve similar quantities compared to milling but with now tool wearing. This enables to create a highly efficient and economic process. The advantage of the new technology lies in modular modules and the ability to cover the requirements of automotive industry concerning process stability, reproducibility and variety of machinable materials. This technology was introduced the first time in Germany in industrial scale by the Performing Organisation.	
Keywords: <b>PECM, high tensile metallic materials, electrochemical discharge</b>	

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
1.1	Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner	3
1.2	Ausgangssituation	4
2.	Vorhabenumsetzung	5
2.1	Ziel des Vorhabens	5
2.2	Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	6
2.3	Umsetzung des Vorhabens	8
2.4	Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	11
2.5	Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	11
2.6	Konzeption und Durchführung des Messprogramms	13
3.	Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung	14
3.1	Bewertung der Vorhabendurchführung	14
3.2	Stoff- und Energiebilanz	14
3.3	Umweltbilanz	18
3.4	Wirtschaftlichkeitsanalyse	19
3.5	Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	20
4.	Übertragbarkeit	21
4.1	Erfahrungen aus der Praxiseinführung	21
4.2	Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)	22
5.	Zusammenfassung/ Summary	23
6.	Literatur	24
7.	Anhang	24

# 1. Einleitung

## 1.1 Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner

Die Firma MEWATEC ist ein mittelständisches Unternehmen mit aktuell 13 Mitarbeitern und dem Hauptbetätigungsfeld in der spanabhebenden Bearbeitung von Metallen und Kunststoffen. Seit November 2005 ist MEWATEC nach ISO 9001:2000 zertifiziert. Aktuell befindet sich der neue Firmensitz in der Senator-Franz-Burda-Straße 13 in Renchen im Aufbau.



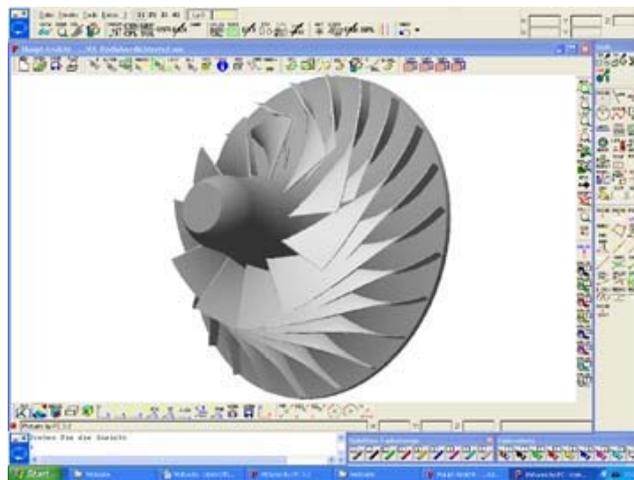
*Abbildung 1: Neuer Firmensitz der Firma MEWATEC*

Das Leistungsspektrum umfasst folgende Fertigungsbereiche:

- Drehen
- Fräsen
- Nachbearbeiten
- Montage

Parallel zu den Präzisionsdreh- und Frästeilen bietet MEWATEC eine Reihe von Dienstleistungen an, die über die Auswahl des möglichen Fertigungsverfahrens, die Materialwahl bis hin zur konstruktiven Unterstützung mittels CAD / CAM gehen. Das Dienstleistungsspektrum umfasst eine Reihe von typischen Aufgabenfeldern, die MEWATEC, im Verbund mit der Fertigung und Montage, zum Komplettanbieter für kleinere Losgrößen machen. Dazu zählen sowohl die CAD-Bearbeitung von Kundenzeichnungen, als auch das Erstellen von eigenen CAD-Zeichnungen. Zum Erstellen von 2D-Zeichnungen und 3D-Modellen wird das CAD / CAM - Programmpaket „Pictures by PC“ von der Fa. Schott Systeme aus München eingesetzt. Die ermöglicht den gesamten Produktzyklus von der Konstruktion bis zur Fertigung abzudecken. Es können folgende Zeichnungsformate gelesen werden: DXF, DWG, DGN, SAT und STL.

Weiterhin können FEM-Berechnungen und CFD-Simulationen durchgeführt werden. Die Berechnung von statischen und dynamischen Maschinenelementen erfolgt mittels computergestützter Berechnungssoftware. Es besteht reichhaltige Erfahrung in der Auslegung und Konstruktion von Gasturbinen, sowohl aerodynamisch als auch thermodynamisch. Dazu zählt auch die Auslegung von Lagerungen für schnelllaufende Maschinen, die Konstruktion und Auslegung von Schmierkreisläufen und deren Abdichtung, sowie die Übertragung von Wellenleistungen mittels Zahnrad- und Zahnriemengetriebe.



**Abbildung 2: FEM Berechnung und CFD Simulation als Dienstleistung**

Die Entwicklungsaktivitäten mündeten in der Durchführung mehrere bezuschusster Projekte im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand. Dies unterstreicht die Bemühungen des Unternehmens bei der Umsetzung von Produkten und Verfahren, durch das stets technologische Grenzen durch eigene Aktivitäten neu definiert wurden.

## 1.2 Ausgangssituation

Die Abkürzung AHSS steht für advanced high strength steel und bezeichnet moderne hochfeste unlegierte Stahlsorten (umgangssprachlich auch „Kohlenstoffstahl“, „Karbonstahl“, AHS-Stahl). Diese Stähle finden beispielsweise im Automobilbau Anwendung. Hier werden sie für sicherheitsrelevante Elemente zur Aufnahme von Verformungsenergie eingesetzt. Dadurch werden die Karosserien leichter und fester, was sowohl zur Gewichtseinsparung als auch zur Crashesicherheit beiträgt.

Zu den AHS-Stählen gehören beispielsweise Dualphasenstahl, Mehrphasenstahl, höchstfester Komplexphasenstahl und Bake-hardening-Stahl. Eine Besonderheit ist TRIP-Stahl (Transformation Induced Plasticity, zu deutsch „umwandlungsbewirkte Plastizität“) und TWIP-Stahl (Twinning Induced Plasticity, zu deutsch „Zwillingsbildung induzierte Plastizität“). TRIP- und TWIP-Stähle ändern ihre Festigkeit bei Verformung.

In den letzten Jahren werden verstärkt höher- und hochfeste Stähle eingesetzt. Grundlage einer wirtschaftlichen Bearbeitung dieser Materialien – respektive im Bereich der Zerspanung – sind Werkzeuge für die Hochleistungszerspanung (High Performance Cutting oder HPC). Die Werkzeuge bspw. beim Fräsen erreichen jedoch

immer öfter ihre Grenzen. Durch den mechanisch- verursachten Abtrag entsteht **Verschleiß am Werkzeug**.

Je nach Schneidwerkstoff muss dafür Sorge getragen werden, **Kühlflüssigkeit** mit bis zu 14 bar einzubringen, welche den Fräser abkühlt (Sattstrahlkühlung). In vielen Fällen kann eine ausreichende Versorgung mit Kühlflüssigkeit speziell beim Fräsen jedoch nicht gewährleistet werden und es kommt zu einer starken thermischen Wechselbelastung. Als Folge treten Kamm- und Querrisse auf.

Schneidplatten aus Hartmetall, Keramik oder Diamant (PKD) sind entweder einzeln an Werkzeugträgern angeschraubt oder geklemmt und können je nach Geometrie der Schneidplatte bis zu achtmal wiederverwendet werden. Diese Aufnahmen sind sehr langlebig aber gleichzeitig **teuer**.

Durch den mechanischen Eingriff entstehen neben dem Verschleiß noch hohe energetische Verluste. Ein Großteil der Nennleistung der Bearbeitungsmaschine wird bei Fräsprozess in **Verlustwärme** umgewandelt. Diese beträgt etwa 40% der Nennleistung.

Ein weiterer Aspekt ist die Oberflächenqualität. Insbesondere bei komplexen Freiformgeometrien, wie sie z.B. bei Bauteilen in der Fluidik benötigt werden, werden zeitaufwändige manuelle Nachbearbeitungsprozesse benötigt. Diese sind durch hohen **Ausschuss** und **Kosten** geprägt.

## 2. Vorhabenumsetzung

### 2.1 Ziel des Vorhabens

Gegenstand des Projektes war die erstmalige Umsetzung einer Anlage zur Bearbeitung hochfester metallischer Werkstoffe durch elektrochemischen Abtrag (PECM).

Hauptziel des Vorhabens war, den Energieverbrauch zur Bearbeitung hochfester metallischer Bauteile gegenüber konventioneller zerspanender Technologie deutlich zu reduzieren. Angestrebt war eine energetische Einsparung von 80% bezogen auf das bearbeitete Werkstück.

Zudem sollte der Anfall von Ausschuss und der Einsatz problembehafteter Stoffe wie Kühlschmiermittel sowie der Werkzeugverschleiß minimiert und die Fertigungsmöglichkeiten für komplexe Bauteile aus hochfesten Stählen erweitert werden.

Als positiver Nebeneffekt sollte die Bearbeitungszeit verkürzt und damit die Produktivität erhöht werden.

## 2.2 Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Die technische Lösung war eine neuartige Maschinengeneration einer PECM-Anlage, die erstmals in einem serienfähigen und modular erweiterbaren Maschinenkonzept am Markt verfügbar ist.

Die hier eingesetzte elektrochemische Metallbearbeitung basiert auf dem Prinzip der Elektrolyse. Das Werkzeug wird als Kathode und das Werkstück als Anode an eine Gleichspannungsquelle angeschlossen. In einer wässrigen Elektrolytlösung erfolgt zwischen Kathode und Anode ein Ladungsaustausch, der das Werkstück gezielt bearbeitet.

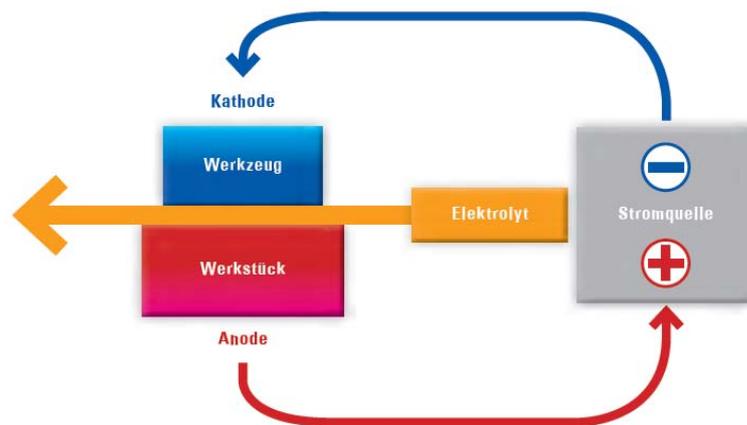


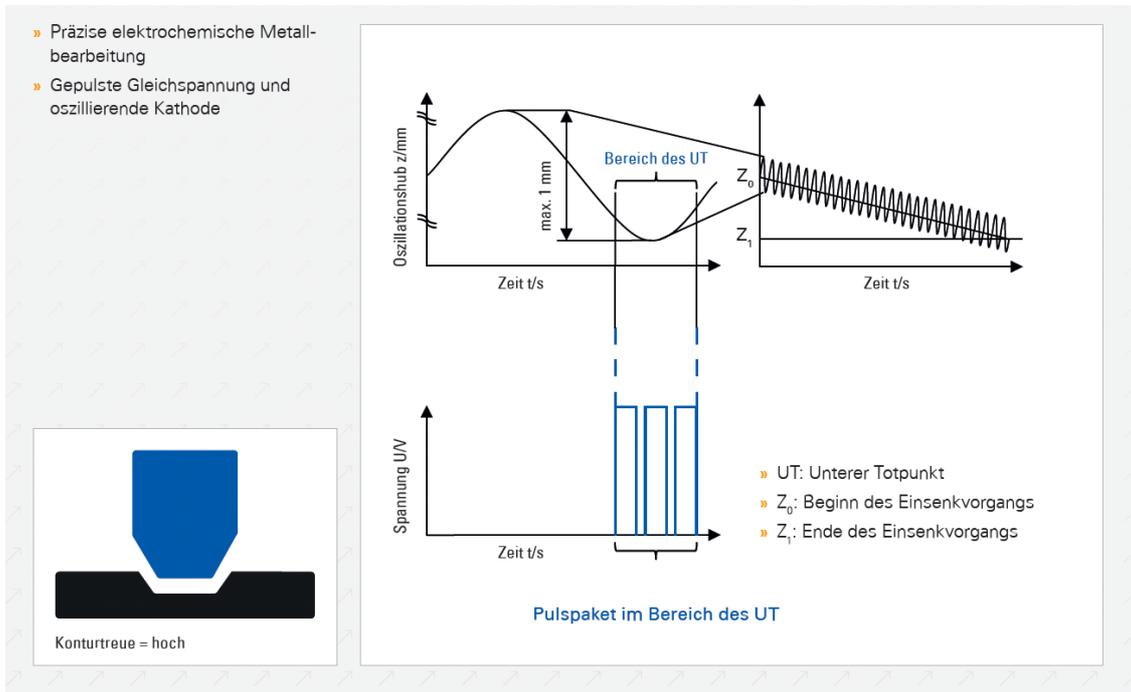
Abbildung 3: Grundsätzliches Funktionsprinzip (Quelle EMAG)

Das dabei abgetragene Material fällt als Metallhydroxid aus der Elektrolytlösung aus, wird herausgefiltert und kann wiederverwendet werden.

Die Besonderheit der hier erstmals eingesetzten Maschinengeneration ist eine gepulste Gleichspannung und eine oszillierende Kathode. Durch die Kombination dieser beiden Technologien können folgende Vorteile erreicht werden:

- Nahezu kein Werkzeugverschleiß (Kathode), damit gute Voraussetzungen für die Serienfertigung
- Rautiefen bis zu Rz 0,2 / Ra 0,05 (materialabhängig)
- Abbildungsgenauigkeit < 20 µm
- Keine thermische und mechanische Beeinflussung der Bauteile und damit keine Veränderungen der Werkstoffeigenschaften
- Sehr hohe Wiederholungsgenauigkeit
- Hocheffizienter Fertigungsprozess, keine Nacharbeiten wie Entgraten oder Polieren notwendig
- Schruppen / Schlichten / Polieren in einem Arbeitsgang
- Bearbeitung von schwer zerspanbaren Werkstoffen

Das Funktionsprinzip der gepulsten Gleichspannung und der oszillierenden Kathode zeigt die folgende Abbildung.



**Abbildung 4: Kombinierte gepulste Gleichspannung und oszillierende Kathode (Quelle EMAG)**

Auslegung und Leistungsdaten:

- Nennleistungen der neuen EMAG PECM Anlage
  - Generator 120 kVA
  - Maschine 60 kVA
  - Elektrolytsystem 25 kVA
  - Summe: 205 kVA
  - Benötigte Durchschnittsleistung: ca. 25% ~ 50 kVA
- Elektrolyt  $\text{NaNO}_3$  /  $\text{NaCl}$
- Oszillator 25 kN

Der Lieferant der Anlage ist nachfolgende Firma:

Lieferant: EMAG Holding GmbH  
Austrasse 24 73084 Salach

## 2.3 Umsetzung des Vorhabens

Nachdem die neue Halle 11/2015 am Standort in Renchen aufgebaut war (Abbildung 1) wurde die Anlage, welche durch die Firma EMAG geliefert wurde in 01/2016 aufgebaut und in Betrieb genommen. Hierzu mussten auch die elektrischen Anschlüsse sowie die Wasserversorgung installiert werden.

Weiterhin wurde eine Vorrichtung für das erste Demonstratorbauteil, bei welchem es sich um den Ventilkörper für ein Membranventil handelt, aufgebaut. Anhand dieses Bauteils wurden auch die Versuche durchgeführt, um die Kenngrößen zu ermitteln und die Vorteile der neuen Anlage zu bewerten.

Am 05.02.2016 durften wir die Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Frau Dr. Barbara Hendricks in Renchen begrüßen und konnten das Vorhaben vorstellen.

Aktuell wird die Serienproduktion für das erste Bauteil (Ventilkörper Membranventil) vorbereitet. Die Produktion soll ab 07/2016 beginnen.

Überblick der Meilensteine des Projektes:

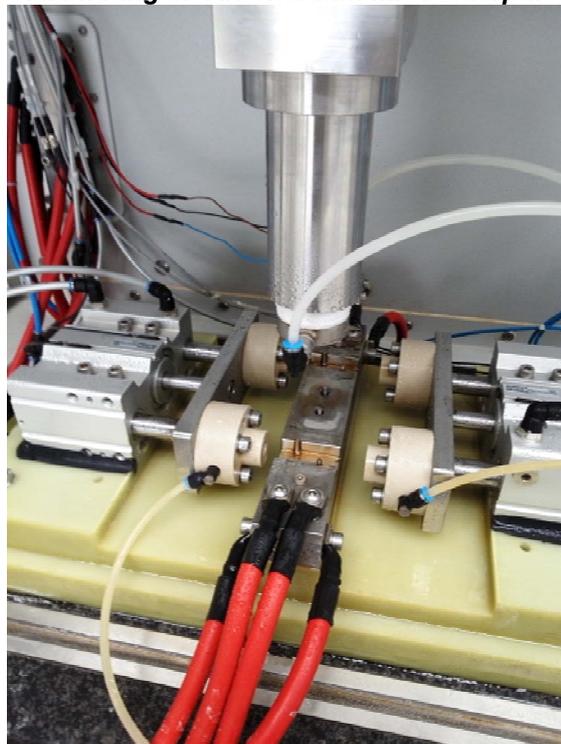
11/2015	Schaffung Infrastruktur
01/2016	Einrichtung der Maschine
Seit 02/2016	Versuchsfertigung
Ab 07/2016	Serienfertigung



**Abbildung 5: Gesamtaufbau (Arbeitsraum mit Achsen, Kathode, Anode links und Elektrolytaufbereitung rechts)**



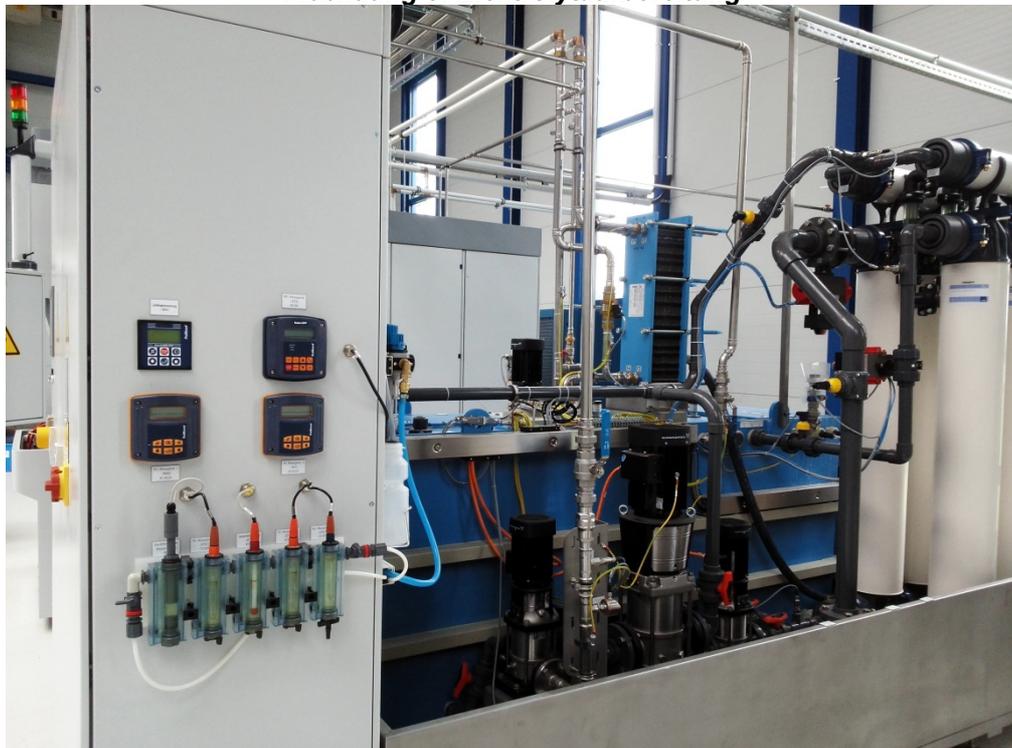
**Abbildung 6: Arbeitsraum mit Steuerpult**



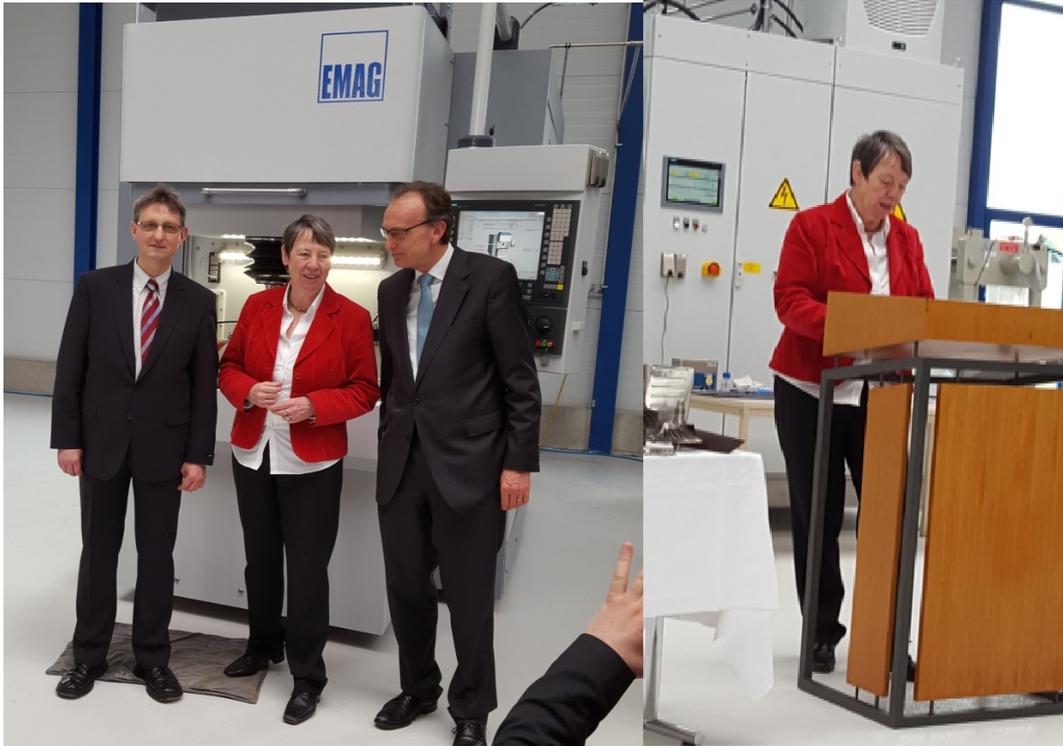
**Abbildung 7: Detail Arbeitsraum mit von MEWATEC erstellter Vorrichtung)**



**Abbildung 8: Elektrolytaufbereitung**



**Abbildung 9: Elektrolytaufbereitung**



**Abbildung 10: Besuch von Frau Dr. Barbara Hendricks**

## **2.4 Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)**

Die behördlichen Anforderungen zur Umsetzung der Technologie sind minimal einzuschätzen. Die Elektrolytsalze (z.B. Natriumnitrat) müssen in einem abgeschlossenen Container gelagert werden, da sie brandbeschleunigende Wirkung haben. Ansonsten bestehen keine weiteren Anforderungen, welche sich von den üblichen Sicherheitsmaßnahmen bei einem Fertigungsbetrieb unterscheiden.

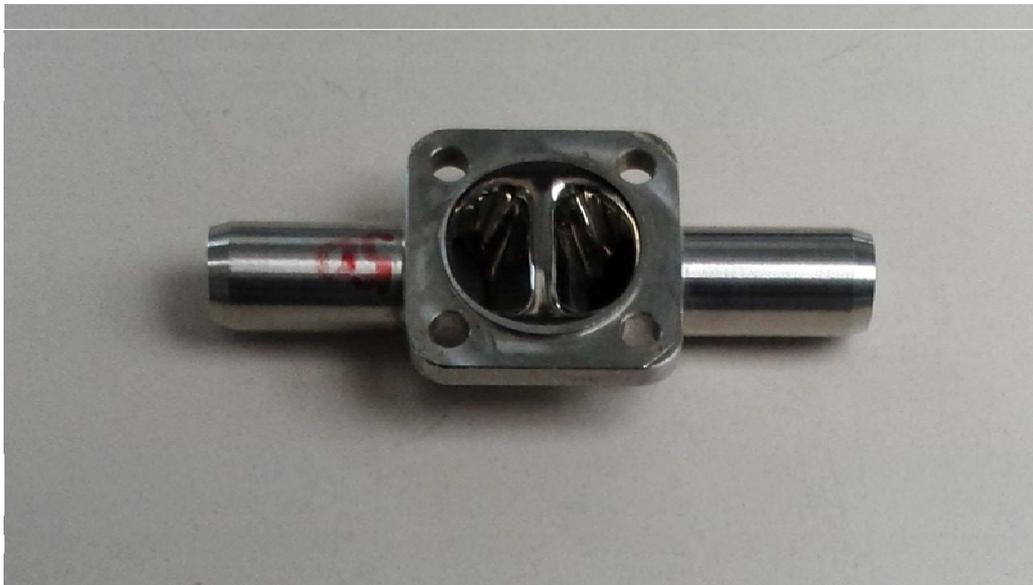
## **2.5 Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten**

Die Versuche wurden an einem Demonstratorbauteil durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen Ventilkörper für ein Membranventil. Hierzu wurde seitens MEWATEC eine spezielle Vorrichtung aufgebaut.

Bei diesem Bauteil muss aus dem Halbzeug eine komplexe Geometrie herausgearbeitet werden, welches eine hochpräzise Kontur aufweisen muss, damit die fluidische Funktionalität und Dichtwirkung erreicht wird.



**Abbildung 11: Demonstrationsbauteil Ventilkörper eines Membranventils vor (links) und nach (rechts) der Bearbeitung**



**Abbildung 12: Detail der komplexen Geometrie und Oberfläche**

Es wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen Prozesseinstellungen der PECM Anlage durchgeführt. Diese waren:

- 22 Versuche mit Schruppen des Bauteils in 5 Schritten und anschließendem Polieren
- 35 Versuche mit Schruppen des Bauteils in 3 Schritten und anschließendem Polieren

Die dabei an der Steuerung der Maschine eingestellten und erfassten Leistungen und Bearbeitungszeiten wurden protokolliert und ermöglichen daher direkten Rückschluss auf den Energieverbrauch.

Im Rahmen der Fertigung der Demonstratorbauteile ist kein messbarer Verbrauch der Elektrolytlösung aufgetreten. Dies liegt daran, dass lediglich verdunstetes Wasser nachgefüllt werden muss. Das Elektrolytsalz verbraucht sich grundsätzlich nicht und kann somit jahrelang verwendet werden. Lediglich durch kleine Schwünde, durch anhaftende Elektrolytlösung am Bauteil, kann es dazu kommen, dass zum Aufrechterhalt der Konzentration, Salz nachgefüllt werden muss. Im Rahmen der Versuchsdurchführung war hier keine Verlustmenge erfassbar. Eine in Abstimmung mit dem Hersteller durchgeführte Abschätzung liegt bei einer Jahresmenge von ca.  $\frac{1}{2}$  Sack Elektrolytsalz, was ca. 12 kg entspricht.

Aufgrund der im Rahmen der Messungen gefertigten Menge an Bauteilen, ist bislang noch keine signifikante Menge an Metallschlämmen entstanden, so dass diese aussagekräftig erfasst werden konnte. Die Abschätzung der Menge erfolgt hier deshalb später rechnerisch. Der Verbleib der Abfälle bzw. deren Wiederverwendung ist inzwischen festgelegt und wird ebenfalls später näher erläutert.

Das mit der neuen Anlagentechnologie gefertigte Bauteil wurde dann der konventionellen Fertigung mit Fräsen und anschließendem manuellen Polieren gegenübergestellt. Da das Bauteil bisher nicht bei MEWATEC gefertigt wird, wurde auf Basis von Angaben wie Zeiten und Anschlussleistung in Kombination mit Erfahrungswerten seitens MEWATEC der Energieverbrauch für das Bauteil bei dem konventionellen Verfahren hochgerechnet.

Die Details der Gegenüberstellung sind dann in Kapitel 3.2 und Kapitel 3.3 näher erläutert.

## **2.6 Konzeption und Durchführung des Messprogramms**

Wie beschrieben wurde auf Basis von 22 bzw. 35 Versuchen mit Variation der Prozessparameter der Energieverbrauch ermittelt. Dabei wurde die Leistung variiert und anhand der in der Maschine integrierten Mess- und Anzeigemöglichkeiten ermittelt und protokolliert. Eine zusätzliche Installation von Messeinrichtungen war nicht erforderlich, weshalb die für das Messprogramm vorgesehenen Mittel nicht in Anspruch genommen wurden.

### **3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung**

#### **3.1 Bewertung der Vorhabendurchführung**

Das Vorhaben ist weitestgehend entlang der Planung verlaufen. Es waren während der Umsetzung keine gravierenden Schwierigkeiten aufgetreten.

Erfreulich ist, dass die Versuchsdurchführung an einem konkreten Demonstratorbauteil gemacht werden konnte, welches zukünftig in die Serie gehen wird. Dadurch kann der Umwelt- und Energieeffizienzeffekt des Vorhabens bereits kurzfristig realisiert werden und weiter ausgebaut werden. Die Ventilkörperfertigung soll dann sukzessive auf weitere Baureihen ausgeweitet werden.

Nachdem nun die Anlagentechnik in Betrieb ist, wird seitens MEWATEC kontinuierlich versucht, Fertigungsaufträge für weitere Bauteile zu akquirieren. Hierzu gehören auch z.B. Turbinenräder. Da die Technologie noch neu ist, muss jedoch zunächst kontinuierlich das Vertrauen möglicher Kunden in die Technologie und in die Kompetenz von MEWATEC gewonnen werden. Hierzu sind die bereits gefertigten Demonstratorbauteile ein erster Schritt und helfen MEWATEC zu positionieren. Das energetische Einsparpotential der neuen Verfahrenstechnologie wird sich kontinuierlich mit wachsender Auslastung/Belegung der Anlage erhöhen. Das Einholen der Fertigungsaufträge benötigt jedoch die übliche Zeit eines Vertriebsprozesses.

Die Zusammenarbeit mit dem Hersteller EMAG hat ebenfalls positive Auswirkungen, da gegenseitige Synergien im Voranbringen der neuen Anlagentechnologie bestehen.

Durch die Veröffentlichung der Technologie und die ersten erfolgreich hergestellten Demonstratorbauteile ist es bereits auch gelungen das Interesse bei potentiellen Kunden zu wecken. So werden aktuell auch Gespräche mit BOSCH geführt, bei welchen die Möglichkeiten eruiert werden, spezielle komplexe Werkzeuge bei MEWATEC mit dem PECM Verfahren fertigen zu lassen. Weiterhin werden gerade von einem anderen Hersteller Muster analysiert, welche ebenfalls aus dem Bereich der Ventiltechnik sind. Hier geht es um die Bearbeitung einer kreisrunden Oberfläche, auf welcher eine Dichtplatte aufliegt. Durch die hohe Oberflächenqualität des PECM Verfahrens wird hier eine signifikante Erhöhung der Lebensdauer des Bauteils erwartet, da es zu geringerem Verschleiß an der Wirkungsfläche der Dichtung kommt.

#### **3.2 Stoff- und Energiebilanz**

Details sind in den beigefügten Anlagen des Abschlussberichtes aufgeführt.

##### **Elektrische Energie des Bearbeitungsprozesses Fräsen bzw. PECM**

Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, welche die Grenzen hinsichtlich Energieverbrauch und Bearbeitungszeit aufzeigen sollten (vgl. Anlage „Energiebilanz mit Demonstratorbauteil energie- bzw. zeitoptimiert“).

In der energieoptimierten Versuchsdurchführung wurden insgesamt 5 aufeinander folgende Schritte zum Schruppen des Bauteils mit unterschiedlichen Leistungsstär-

ken durchgeführt. Nach dem Schruppen wurde das Bauteil in der Maschine mit entsprechenden Prozessparametern poliert. Als Ergebnis erhält man ein fertig bearbeitetes Bauteil, welches mit dem minimalen Energieaufwand je Stück hergestellt wurde.

In der zeitoptimierten Versuchsdurchführung wurde in nur 3 aufeinander folgenden Schritten das Bauteil mit unterschiedlichen (sehr hohen) Leistungsstärken geschruppt. Anschließend erfolgte ebenfalls das Polieren mit den dazugehörigen Prozessparametern. Als Ergebnis erhält man somit die höchste Produktivität, d.h. die minimale Fertigungszeit je Stück.

Bei der optimalen Prozessparameterwahl kann gegenüber dem konventionellen Verfahren je Stück eine Zeiteinsparung von 85% und eine Energieeinsparung je Stück von 80% erreicht werden. Selbst bei maximaler Produktivität mit 90% Zeiteinsparung, je Stück beträgt die Energieeinsparung immer noch 64% je Stück.

Im Folgenden wurden sowohl für die energieoptimierte als auch für die zeitoptimierte Prozessführung des PECM-Verfahrens die absoluten Mengen pro Jahr ermittelt.

Hierbei wurde zunächst auf die zum jetzigen Zeitpunkt realistische Auftragsmenge für ein Jahr hochgerechnet.

Weiterhin wurde unter Berücksichtigung der maximal möglichen Auslastung der Anlage die theoretische produzierbare Stückzahl für ein Jahr hochgerechnet.

Die folgende Übersicht zeigt den Vergleich des Energieverbrauches zwischen konventioneller und neuer Fertigung bezogen auf den Energieträger Strom:

Elektrische Energie des Bearbeitungsprozesses (energieoptimiert)

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück kWh	7,60	1,52	6,08
Je Stück kg CO <sub>2</sub>	4,26	0,85	3,41
Jahr kWh *	243.200	48.649	194.551
Jahr kg CO <sub>2</sub> *	136.192	27.243	108.949

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung (Jahresstückzahl 32.000 Teile)

Elektrische Energie des Bearbeitungsprozesses (zeitoptimiert)

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück kWh	7,60	2,71	4,89
Je Stück kg CO <sub>2</sub>	4,26	1,52	2,74
Jahr kWh *	364.800	129.888	234.912
Jahr kg CO <sub>2</sub> *	204.288	72.738	131.550

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung (Jahresstückzahl 48.000 Teile)

Anmerkungen:

1)

Beim konventionellen Verfahren müssten jedoch mehrere Maschinen (oder mehrere Spindeln) verwendet werden, um überhaupt die Stückzahl produzieren zu können, da die reine Bearbeitungsdauer alleine beim Fräsen nahezu das dreifache beträgt (ohne Berücksichtigung des Polierens!).

Dies ist hier nicht berücksichtigt, so dass die ermittelten Werte eine sehr konservative Angabe darstellen.

2)

Alle Werte beziehen sich auf das Demonstratorbauteil, mit den erfassten Ist-Werten. Bei anderen Bauteilen (z.B. für Turbinen oder den Luftfahrtbereich), können noch höhere absolute Werte bezogen auf das jährliche Einsparpotential erreicht werden. Diese hängen dann immer von den konkreten Bauteilen und den akquirierbaren Aufträgen ab.

Wir bewerten die relativen Werte daher als aussagekräftiger und die Energieeinsparung von 80% je Stück konnte durch die Versuche bestätigt werden

### **Werkzeuge:**

Beim Fräsen wird ein Fräser aus Wolframcarbid mit Durchmesser 4 mm, Länge 80 mm, und Gewicht 16 g eingesetzt. Nach 2 Bauteilen muss dieser ersetzt werden. Die verschlissenen Werkzeuge werden üblicherweise gesammelt und das Wolframcarbid gemahlen und erneut gesintert.

Laut Literaturwerten (TU Delft, 2012) beträgt der kumulierte Energieaufwand (KEA) für die Herstellung des Wolframcarbids 98,4 MJ/kg. Das damit verbundene Treibhauspotential beträgt 4,6 kg CO<sub>2</sub> / kg.

Daraus ergibt sich bei dem Gewicht von 16 g ein Energiebedarf von 1,57 MJ und ein CO<sub>2</sub> Äquivalent von 74 g je Fräser.

Werkzeuge:

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück Anzahl Fräser	0,5	Entfällt da verschleißfrei	0,5
Je Stück kg CO <sub>2</sub>	0,037	Entfällt da verschleißfrei	0,037
Anzahl Fräser pro Jahr	16.000 bzw. 24.000	Entfällt da verschleißfrei	16.000 bzw. 24.000)
Treibhausgaspotential pro Jahr (kg CO <sub>2</sub> /a)	589 bzw. 884	Entfällt da verschleißfrei	589 bzw. 884

Bezogen auf das Demonstratorbauteil und eine angenommene maximale Auslastung der Anlage (Jahresstückzahl 32.000 Teile bzw. 48.000 Teile) wird das Treibhausgaspotential durch den entfallenden Werkzeugverschleiß um 589 kg bzw. 884 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr gemindert; im Vergleich zur Energieeinsparung im Bearbeitungsprozess fällt diese THG-Minderung allerdings nicht in Gewicht.

### Kühlschmiermittel:

Hier wird von einer Jahresmenge von 8 m<sup>3</sup> ausgegangen. Diese Menge muss jährlich vergleichbar mit einem „Ölwechsel“ entsorgt werden, da das Kühlschmiermittel eine begrenzte Standzeit hat.

Kühlschmiermittel zu entsorgen:

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück cm <sup>3</sup>	250	entfällt	250
Jahr m <sup>3</sup> *	8	entfällt	8

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung (Jahresstückzahl 32.000 Teile bzw. 48.000 Teile)

Hinweis: Der Elektrolyt bei der neuen Anlage muss nicht entsorgt werden. Es muss lediglich verdunstetes Wasser (vgl. Auffüllen einer Bleibatterie mit destilliertem Wasser) nachdosiert werden.

Laut Herstellerangaben kommt es aufgrund von an den Bauteilen anhaftenden Elektrolytsalz nur zu kleinerem Schwund, welcher auf ca. 12 kg Elektrolytsalz pro Jahr geschätzt wird. Insgesamt kann die Elektrolytlösung kontinuierlich verwendet (bis zu 10 Jahre) und es muss im Regelbetrieb nichts entsorgt werden.

### Späne bzw. Metallschlämme:

Bei dem Demonstratorbauteil wird ein Volumen von ca. 6 cm<sup>3</sup> entfernt (Fräsen bzw. PECM).

Beim Fräsen erfolgt keine chemische Umwandlung, d.h. die Masse der Späne beträgt 48 g (Dichte bei hochlegierten Stählen ca. 8 g/cm<sup>3</sup>). Die Späne sind dabei mit Kühlschmiermittel verunreinigt und werden durch einen Schrotthändler entsorgt. In den anschließenden Prozessen bei den Verwertungsunternehmen muss das Kühlschmiermittel von der Späne entfernt werden (i.d.R. Zentrifugieren). Das Metall wird in der Stahlindustrie wiederverwertet.

Beim PECM erfolgt eine Umwandlung des abgetragenen hochlegierten Stahls in Eisenhydroxide, vorwiegend Eisen(III)-hydroxid. Im Rahmen der Versuche mit dem neuen Verfahren (Probetrieb) waren keine signifikanten Mengen an Metallschlamm angefallen und messtechnisch zu erfassen. Die Menge kann jedoch einfach abgeschätzt werden. Die Legierungsanteile im Stahl und die Mischformen des Eisenhydroxids sind dabei vernachlässigt.

Stahl: Fe: 55,85 g/mol  
Metallschlamm: Fe(OH)<sub>3</sub> 106,867 g/mol

→ Aus 1 kg Stahl entsteht durch die chemische Reaktion im PECM Verfahren ca. 1,9 kg Metallschlamm

Die Metallschlämme sollen von der Nickelhütte Aue GmbH, Rudolf-Breitscheid-Str. 65-75, 08280 Aue abgenommen und wiederverwertet werden. Hierzu haben bereits

Gespräche stattgefunden. MEWATEC erhält für die Metallschlämme zusätzlich eine Vergütung. Bei MEWATEC entsteht hierbei kein zusätzlicher energetischer Aufwand. Der Filterkuchen wird aus der PECM-Anlage entnommen und kann in einem Kunststofffass transportiert werden.

Späne bzw. Metallschlämme:

	Konventionell Späne	Neue Anlage Metallschlamm	Einsparung
Je Stück g	48	91,2	wiederverwertbar ohne Abtrennpro- zesse von kriti- schem KSS
Jahr kg *	1.536 / 2304	2.918 / 4.376	wiederverwertbar ohne Abtrennpro- zesse von kriti- schem KSS

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung (Jahresstückzahl 32.000 Teile bzw. 48.000 Teile)

Ergänzend sei erwähnt, dass das Polieren im konventionellen Prozess manuell stattfindet. Aufgrund der manuellen Arbeit ist auch mit einer Ausschussquote von bis zu 10% zu rechnen (Erfahrungswerte aus der bisherigen Ventilherstellung). Da das Polieren der letzte Schritt ist, ist Ausschuss besonders problematisch, da bereits fast die gesamte Wertschöpfung und die meiste Energie bereits in das Werkstück geflossen sind. Beim PECM-Verfahren findet hingegen das Polieren automatisch mit hoher Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit (99,99966 %) in der Anlage statt.

### 3.3 Umweltbilanz

Die Werte wurden in 3.2 näher hergeleitet. Zusammenfassend kann folgender Vergleich anhand des konkreten Demonstratorbauteils bezüglich der Umweltbilanz getroffen werden.

Elektrische Energie des Bearbeitungsprozesses sowie Werkzeugverschleiß  
(energieoptimiert)

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück kg CO <sub>2</sub>	4,3	0,85	3,45
Jahr kg CO <sub>2</sub> *	136.781	27.243	109.538

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung (Jahresstückzahl 32.000 Teile)

Elektrische Energie des Bearbeitungsprozesses sowie Werkzeugverschleiß  
(zeitoptimiert)

	Konventionell	Neue Anlage	Einsparung
Je Stück kg CO <sub>2</sub>	4,3	1,52	2,78
Jahr kg CO <sub>2</sub> *	205.172	72.738	132.434

\*bezogen auf das Demonstratorbauteil und angenommener maximaler Auslastung  
(Jahresstückzahl 48.000 Teile)

Die Zielsetzung der energetischen Einsparung von über 80% je Stück konnte bestätigt werden. Ebenso konnten die Bearbeitungszeiten um über 80% reduziert werden.

Die zum Betrieb des konventionellen Verfahrens erforderlichen Kühlschmiermittel und deren Entsorgung fallen weg. Die Elektrolytlösung muss nicht entsorgt werden. Die beim neuen Verfahren entstehenden Metallschlämme können direkt in einer Nickelhütte wiederverwertet werden. Im Gegensatz dazu sind beim konventionellen Verfahren die Späneabfälle mit kritischem Kühlschmiermittel verunreinigt, was vom Transport (Abtropfen) bis zur Verwertung (Trennung durch z.B. Zentrifugieren) ein Nachteil darstellt.

### 3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Anhand des Demonstratorbauteils ergibt sich die folgende Vergleichsrechnung:

- Den Stundensatz des PECM Verfahrens setzt MEWATEC mit 250 € an.
- Der Stundensatz für 5-Achs-Fräsen beträgt 100 €
- Der Stundensatz für manuelles Polieren liegt bei 40€ (nur in Kombination mit Fräsen erforderlich).

Wie aus den durchgeführten Versuchen ermittelt wurde, lag die Bearbeitungszeit beim PECM-Verfahren (Schruppen+Polieren) zunächst bei 6,74 min und nach weiterer Optimierung bei 4,65 min. Es kann also eine Bearbeitungszeit von 5 min angenommen werden.

Multipliziert mit dem Stundensatz ergeben sich also Herstellkosten von 20,83 € für das betrachtete Bauteil mit dem PECM Verfahren.  
Da jedoch auf der PECM Maschine 2 Teile gleichzeitig hergestellt werden können, beträgt der Stückpreis demnach nur 10,415 €.

Beim Fräsen wird eine mittlere Bearbeitungszeit von 15 min angesetzt. Danach muss das Bauteil noch manuell im Mittel für 45 min poliert werden.

Multipliziert mit den jeweiligen Stundensätzen ergeben sich also Herstellkosten von 55 € (25 € Fräsen, 30 € Polieren). Beim Fräsen wird nur ein Bauteil bearbeitet!

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ausschussquote beim manuellen Polieren bei bis zu 10% liegen kann, während diese beim automatischen Polieren innerhalb des PECM bei nahezu Null liegt.

Bei dem betrachteten Bauteil wird von einer Jahresstückzahl von 7.000 ausgegangen. Daraus ergibt sich bei diesem Bauteil eine reine Herstellkosteneinsparung (ohne Berücksichtigung der Effekte wie Werkzeugverschleiß, Kühlschmiermittelentsorgung, Ausschuss) von  $7.000 \times (55,00 \text{ €} - 20,83 \text{ €}) = \underline{239.190,00 \text{ €}}$ , was dieses Verfahren enorm attraktiv macht.

MEWATEC kann dadurch die Teile sowohl zu attraktiven Preisen bei gleichzeitig signifikant gesteigerter Qualität anbieten.

Der Erlös bei diesem Bauteil wird mit ca. 13,00 € pro Stück angesetzt. Bei einer Jahresstückzahl von 7.000 € liegt dieser dann bei 91.000,00 €.

Durch weitere Aufträge (Weitere Ventilkörperbaureihen und weitere andere Bauteile) und dem Aufbau eines Zweischichtbetrieb zu je 8 Stunden/ 5 Tage strebt MEWATEC an, bei hoher Auslastung einen Umsatz von mindestens 700.000,00 € mit der Anlage zu erlösen.

Wird diese hohe Auslastung erreicht kann mit einem Erlös von jährlich mindestens 250.000 € durch die Anlage gerechnet werden.

Als eine realistische Hochlaufkurve für MEWATEC auf Basis des aktuell angestrebten erzielbaren Erlöses mit der Anlage kann also folgende Annahme zur Amortisation getroffen werden.

	Investition	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3	Jahr 4
Erlöse	<del>650.000</del>	100.000	200.000	250.000	250.000
Restsumme	650.000	550.000	350.000	100.000	-150.000

Amortisationszeit ca 3,4 Jahre

Zusammenfassend und allgemein auf die Anlagentechnologie übertragen kann gesagt werden, dass in Abhängigkeit von den zu fertigenden Bauteilen, der erzielbaren Margen und der Hochlaufkurve der Fertigungsstückzahlen das Verfahren mittlere Amortisationszeiten von 2,5 bis 4 Jahre erreichen kann. Dadurch schließt diese Technologie zu den konventionellen Verfahren wie Fräsen stark auf und es kann von einer guten Voraussetzung für eine weitere Verbreitung ausgegangen werden. Für viele neue und für den Standort Deutschland wichtige komplexe High-Tech-Bauteile, wird diese Fertigungstechnologie zum „Enabler“.

### 3.5 Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

#### Betrachtungsbereich:

Fertigungstechnologien für hochfeste Stähle (AHS-advanced high strength steel)

#### Vorteil gegenüber zerspanenden Verfahren:

- Geringer Energieverbrauch
- Kürzere Bearbeitungszeit

- Man kann Elektroden frei gestalten und parallel mehrere Löcher/Kavitäten erzeugen und komplizierteste Geometrien schaffen, ohne mehr Spindeln oder Antriebe zu benötigen (bzw. Verbraucher generell)
- Wegfall manueller Nachbearbeitungsschritte wie Polieren (Schlechte Ergonomie, Stäube, Ausschuss, Kosten)
- Keine Entsorgung von Kühlschmierstoffen erforderlich
- Elektrolyt kann wiederverwendet bzw. aufbereitet werden
- Nahezu kein Werkzeugverschleiß

#### Vorteil gegenüber bisheriger elektrochemisch abtragender Verfahren:

- Keine problembezogene Sonderkonstruktionen sondern standardisierte Module in unterschiedlichen Ausbaustufen möglich
- Kombinierbar mit automatischer Beschickung
- Hohe Prozessstabilität, Reproduzierbarkeit und bearbeitbare Werkstoffvielfalt
- Universelles Maschinengestell aus Mineralit mit hoher Bauteilsteifigkeit, chemischer Beständigkeit, thermischer Stabilität und guter Schwingungsdämpfung
- Mechanischer Oszillator mit einem konstanten Z-Vorschub für hocheffizientes Abtragen

## **4. Übertragbarkeit**

### **4.1 Erfahrungen aus der Praxiseinführung**

Die Technologie ist ideal bei Bauteilen, welche anspruchsvolle Oberflächen benötigen. Im speziellen dienen diese Oberflächen dichtungstechnischen, fluidischen oder tribologischen Funktionen.

Der besondere Mehrwert entsteht dadurch, dass die gefertigten Bauteile deutlich schneller und in viel besserer Qualität gefertigt werden können. In der Regel werden durch das Verfahren die Lebensdauer und/oder die Leistungsfähigkeit der Produkte verbessert.

Bei sehr anspruchsvollen oder komplexen Bauteilen, welche durch das Verfahren überhaupt erst herstellbar werden und in Bereichen mit hohen Anforderungen (Sicherheit, Leistungsfähigkeit) liegen, ist auch eine Fertigung in Stückzahl 1 denkbar.

Da jedoch immer Vorversuche zur Evaluierung der Prozessparameter notwendig sind, welche auf die Stückzahl umgelegt werden müssen, wird aktuell von einer wirtschaftlich sinnvollen minimalen Fertigungsstückzahl von 50 bis 100 Stück ausgegangen.

## 4.2 Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Der Demonstrationsbetrieb bietet ein hohes Potential den Durchbruch der Fertigungstechnologie zu erlangen. Prinzipiell könnte jede anspruchsvolle spanende Produktion teilweise oder ganz auf das Verfahren umstellen, insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Produkte aus hochfesten Stählen und neuer Werkstoffe. Mittelfristig wird dieses Demonstrationsvorhaben dafür sorgen, dass auch Vorteile in der Umweltbilanz zur Kaufentscheidung beitragen. Zudem werden neue Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, die erstmals mit einer serientauglichen Anlage möglich sind. Darüber hinaus wird die Produktion mit gleichbleibender Produktqualität (hohe Reproduzierbarkeit), den Durchbruch der Technologie unterstützen.

### Schätzung der Relevanz für die Branche

Der Maschinenbau in Deutschland hat 2013 etwa 207 Mrd. EUR Umsatzerlöse erzielt. Auf Werkzeugmaschinen entfallen hierbei ca. 22,6 Mrd. EUR (~11%), was ein Hinweis auf das Potential der Einsparmöglichkeiten bei Werkzeugmaschinen ist.

In Deutschland existieren insgesamt 3,6 Mio. mittelständische Unternehmen<sup>1</sup> in 2010/2013. Hierzu zählen auch Einzelunternehmer, die den überwiegenden Anteil darstellen. Zum verarbeitenden Gewerbe zählen ca. 37.000 Unternehmen<sup>2</sup>.

Es gibt keine Studie die aufzeigt, wie viele hiervon hochfeste Stähle verarbeiten. Geht man davon aus, dass maximal 10% hiervon zeitweise bis überwiegend hochfeste Stähle verarbeiten, beschäftigt diese Thematik etwa 3.700 Unternehmen dauerhaft. Vor dem Hintergrund der Ausweitung des Einsatzes hochfester Stähle, wird diese Zahl zunehmen. Dies ist natürlich nur eine überschlägige Schätzung, da sich kein Unternehmen ausschließlich auf hochfeste Stähle spezialisiert, bzw. im Umkehrschluss auf nicht- hochfeste Stähle (das entspricht der Mitarbeiterkapazität von ca. 500.000 Beschäftigten pro Jahr, wenn laut der VDMA Statistik 5 Mio. Beschäftigte im verarbeitenden Gewerbe tätig sind).

### Branchenspezifische Kommunikation der Projektergebnisse:

- Ein Artikel über das Verfahren ist in der Fachzeitschrift MM MaschinenMarkt im August aktuell in der Bearbeitung.
- Weiterhin wird die Vorstellung der Technologie auf der Webseite von Mewatec integriert. Dies ist im 3. Quartal 2016 geplant.
- Mit dem Innovationsforum Baden wurde bereits die Veröffentlichung eines Artikels, im Newsletter 10/2016 abgestimmt, welcher an mehrere 1000 Entscheider verteilt wird.
- Darüber hinaus stehen unsere Türen jederzeit für Interessierte offen.

Die weitere Publikation der Ergebnisse ist fortwährend angestrebt.

---

<sup>1</sup> Institut für Mittelstandsforschung Bonn; *Kennzahlen des Mittelstands 2010/2013 in Deutschland*;

## 5. Zusammenfassung/ Summary

Die Mewatec Mechanische Werkstatt & Technologie e.K. stellt Präzisions-, Dreh- und Frästeile her. In der Metallverarbeitung steigt zunehmend die Nachfrage nach hochfesten, niedrig legierten Stahlsorten sowie nach hochwarmfesten Nickelbasislegierungen und Gamma-Titanaluminiden.

Während erstere materialsparende und energieeffiziente Leichtbaukonstruktionen erlauben, werden die Nickelbasislegierungen und Gamma-Titanaluminiden beispielsweise benötigt, um bei Gasturbinenkraftwerken durch Anhebung der Gastemperatur eine Steigerung des Wirkungsgrades zu erreichen.

Allerdings lassen sich diese Werkstoffe mit herkömmlichen spanabhebenden Verfahren (z.B. Bohren, Drehen, Schleifen) nur unter hohem zeitlichen und energetischen Aufwand bearbeiten. Außerdem verschleißten die Werkzeuge zum Drehen oder Fräsen der hochfesten Stähle äußerst schnell.

Ziel des Vorhabens war daher, eine innovative Bearbeitungsmaschine für hochfeste und hochwarmfeste Werkstoffe zu installieren, die eine Bearbeitung dieser Werkstoffe mit geringem Zeit- und Energieaufwand gestattet.

Die Innovation besteht darin, dass die Werkstücke nicht mehr durch ein spanabhebendes Verfahren sondern durch einen elektrochemischen Abtrag (PECM-Verfahren) bearbeitet werden. Dadurch entfällt das bisherige Drehen und Fräsen der Werkstücke, so dass weniger Energie für den Produktionsprozess benötigt wird. Außerdem entfallen die hohen Herstellungskosten der Arbeitswerkzeuge aus Materialien, wie polykristallinem Diamant, Schneidkeramik und Hartmetall. Der bei der Dreh- und Fräsbearbeitung notwendige Kühlschmierstoff, der aufwändig wieder aufgearbeitet oder entsorgt werden muss, entfällt bei der PECM-Bearbeitung komplett.

Beim neuartigen PECM-Verfahren wird dagegen eine Elektrolytlösung aus wässrigem Natriumnitrat mit einem Salzgehalt von 10 bis 20 Prozent verwendet. Die PECM-Anlage hat einen Elektrolytvorrat von 1.000 Liter, der einmal im Jahr ersetzt werden muss. Die anfallende Menge von etwa 500 Kilogramm Metallschlamm pro Jahr kann an andere Unternehmen zur Aufbereitung abgegeben werden.

Das Vorhaben wurde erfolgreich umgesetzt und die Anlage in Betrieb genommen. Erste Demonstratorbauteile wurden auf der Anlage eingerichtet und eingefahren, welche zukünftig in Serie gefertigt werden sollen.

Die Energieeinsparung bezogen auf den Stromverbrauch konnte bei diesem Demonstratorbauteil wie angestrebt um bis zu 80% je Stück reduziert werden. Bezogen auf eine Jahresproduktion 32.000 Stück sinkt der Energieverbrauch zur Bearbeitung der Bauteile um 194.551 KWh; bei einem durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Faktor für die Stromproduktion in Deutschland von 560 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilowattstunde bedeutet dies eine indirekte Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 109 Tonnen pro Jahr. Bezogen auf eine Jahresproduktion von 48.000 Stück sinkt der Energieverbrauch um 234.912 KWh und es werden 132 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr vermieden.

Die Erwartungen hinsichtlich der Vermeidung von Werkzeugverschleiß und Kühlschmiermitteln konnten bestätigt werden. Hinzu kam noch die Erkenntnis, dass bei

dem beim Demonstratorbauteil benötigten Bearbeitungsschritt des manuellen Polierens in der konventionellen Fertigung eine hohe Ausschussquote von 10% herrscht. Dies kann durch das neue Verfahren ebenfalls vermieden werden.

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens kann zu dem konventionellen Verfahren aufschließen und wettbewerbsfähige Amortisationszeiten sind bei entsprechender Auslastung der Anlage durch Fertigungsaufträge machbar.

## 6. Literatur

- TU Delft: The Model of the Eco-costs / Value Ratio: Ecocosts 2012, Version 3.3 (Datenbank). URL: <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/subject/5-data.html> (Stand 06.07.2016)
- Umweltbundesamt (Hrsg.): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015. In: CLIMATE CHANGE 26/2016. Dessau, 2016

## 7. Anhang

Im Anhang befinden sich:

- Detaillierte Darstellung der Versuche mit der PECM Anlage
- Energiebilanz zur Berechnung des Stromverbrauchs (energieoptimiert, zeitoptimiert)

**Abschlussbericht der Versuche bis 20160511**

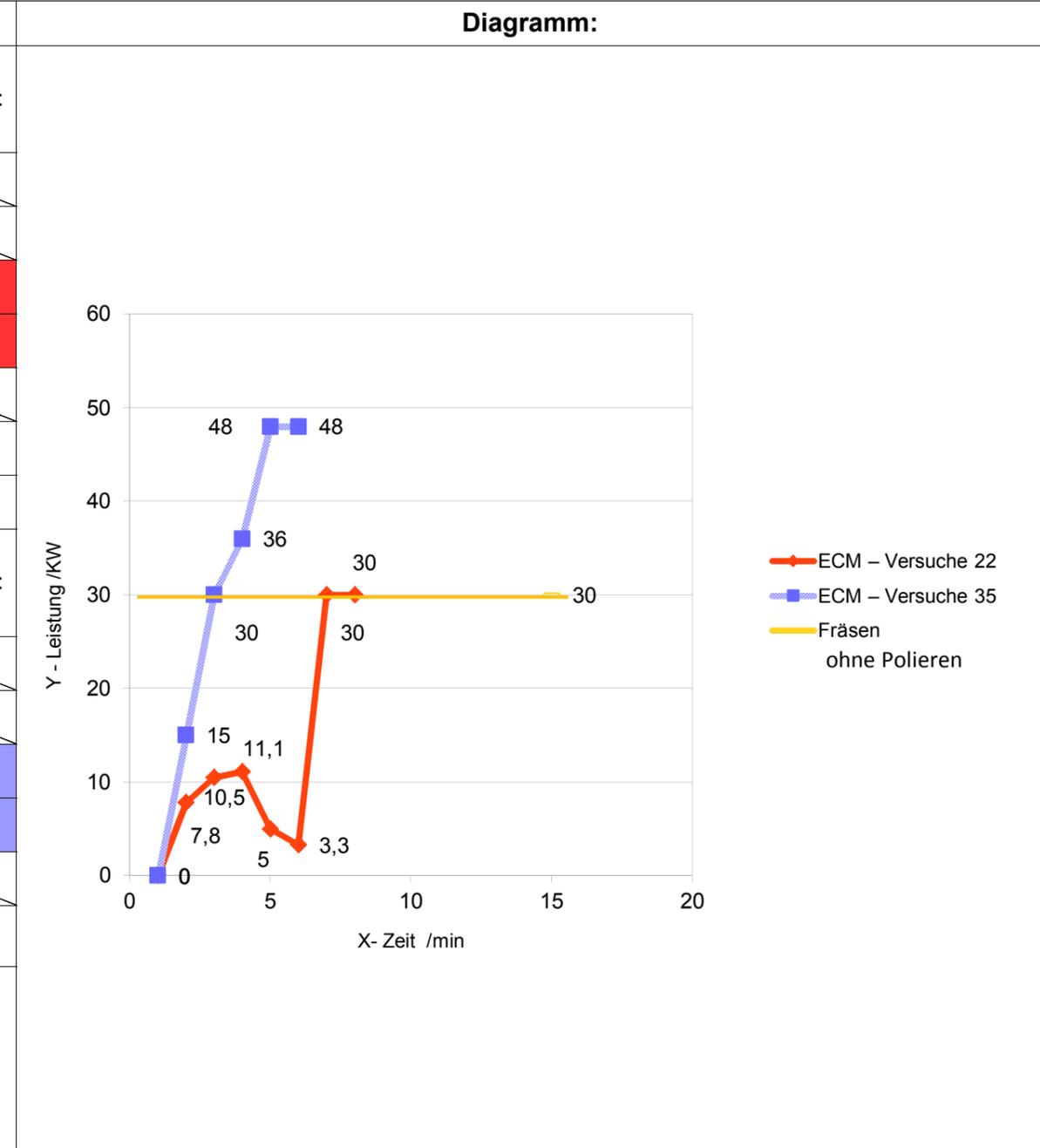
Firma:	Mewatec	Erst.: X.Wang
Projekt:	Ventilkörper	Datum: 20160511
Bediener:	X. Wang	

ECM – Versuche 22								
	Schruppen						Polieren	Insgesamt
	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Insgesamt		
Vorschub / mm/min:	4,2	3,2	2,2	1	0,5			
Tief / mm:	4	3,4	3	1,1	0,3	11,8		
Zeit /min:	0,95	1,06	1,36	1,10	0,60	5,07	1,67	6,74
Zeitverlauf /min :	0,95	2,01	3,37	4,47	5,07	5,07	6,74	
Leistung / KW :	7,8	10,5	11,1	5	3,3		30	

ECM – Versuche 35								
	Schruppen						Polieren	Insgesamt
	Schritt 1	Schritt 2	Schritt 3	Schritt 4	Schritt 5	Insgesamt		
Vorschub / mm/min:	6	4	1					
Tief / mm:	4,1	7,2	0,5			11,8		
Zeit /min:	0,68	1,80	0,50			2,98	1,67	4,65
Zeitverlauf /min :	0,68	2,48	2,98			2,98	4,65	
Leistung / KW :	15	30	36				48	

Fräsbearbeitung			
	Fräsen	Polieren	Insgesamt
Zeit /min:	15	30	45
Leistung /KW :	30	von Hand 200 W	

Zusatzverlust:  
Kühlschmierstoff;  
Fräser



**Energiebilanz mit Demonstratorbauteil energieoptimiert**

		PECM energieoptimiert							
Schritt	Nr.	1	2	3	4	5	Polieren	Summe	
Bearbeitungsdauer	min	0,95	1,06	1,36	1,1	0,6	1,67	6,74	
Bearbeitungsdauer	h	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,11	
Leistung	KW	7,80	10,5	11,1	5	3,3	30	<del>          </del>	
Energiemenge	KWh	0,12	0,19	0,25	0,09	0,03	0,84	1,52	

Zeiteinsparung

**85%**

		konventionelle Herstellung							
Schritt	Nr.	Fräsen					Polieren	Summe	
Bearbeitungsdauer	min	15,00	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	30,00	45,00	
Bearbeitungsdauer	h	0,25	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	0,50	0,75	
Leistung	KW	30,00	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	0,2	<del>          </del>	
Energiemenge	KWh	7,50	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	<del>          </del>	0,10	7,60	

**Elektrische Energie**

<u>Energieoptimierte Energiemenge neues Verfahren je Stück</u>	KWh	1,52
<u>Energiemenge konventionelles Verfahren je Stück</u>	KWh	7,60

**Energieeinsparung 80%** je Stück

Bezugsgröße für die folgenden Berechnungen sind die energieoptimierten Prozessparameter

Eingesparte Energiemenge je Stück	KWh	6,08	
CO2 Einsparung je Stück	0,56 kg/KWh	kg	3,40

Die aktuell realistische Stückzahl für dieses dieses Bauteil pro Jahr beträgt 7.000

Eingesparte Energiemenge bei 7.000 Teilen	KWh	42.558,13	
CO2 Einsparung bei 7.000 Teilen	0,56 kg/KWh	kg	23.832,55

Bezogen auf die Maschinenkapazität (2 Schicht Betrieb mit 80 h/Woche und 50 Wochen jährlich) und ca. 8 Teilen / h wäre eine Fertigungsstückzahl von ca. 32.000 Teilen jährlich möglich, da das Demonstratorbauteil in unterschiedlichen Baureihen gefertigt wird und sukzessive auf das neue PECM Verfahren umgestellt werden könnte.

Eingesparte Energiemenge bei 32.000 Teilen	KWh	194.551,47	
CO2 Einsparung bei 32.000 Teilen	0,56 kg/KWh	kg	108.948,82

**Anmerkung:**

1)

Beim konventionellen Verfahren müssten jedoch mehrere Maschinen (oder mehrere Spindeln) verwendet werden, um überhaupt die Stückzahl produzieren zu können, da die reine Bearbeitungsdauer alleine beim Fräsen nahezu das dreifache beträgt (ohne Berücksichtigung des Polierens!). Dies ist hier nicht berücksichtigt, so dass die ermittelten Werte eine sehr konservative Angabe darstellen

2)

Alle Werte beziehen sich auf das Demonstratorbauteil, mit den erfassten Ist-Werten.

Bei anderen Bauteilen (z.B. für Turbinen oder den Luftfahrtbereich), können noch höhere absolute Werte bezogen auf das jährliche Einsparpotential erreicht werden.

Diese hängen dann immer von den konkreten Bauteilen und den akquirierbaren Aufträgen ab.

Wir bewerten die relativen Werte daher als aussagekräftiger und die **Energieeinsparung von 80% je Stück** konnte durch die Versuche **bestätigt werden**

**Energiebilanz mit Demonstratorbauteil zeitoptimiert**

		PECM zeitoptimiert							
Schritt	Nr.	1	2	3			Polieren	Summe	
Bearbeitungsdauer	min	0,68	1,8	0,5			1,67	4,65	
Bearbeitungsdauer	h	0,01	0,03	0,01			0,03	0,08	
Leistung	KW	15,00	30	36			48		
Energiemenge	KWh	0,17	0,90	0,30			1,34	2,71	

Zeiteinsparung

**90%**

		konventionelle Herstellung							
Schritt	Nr.	Fräsen					Polieren	Summe	
Bearbeitungsdauer	min	15,00					30,00	45,00	
Bearbeitungsdauer	h	0,25					0,50	0,75	
Leistung	KW	30,00					0,2		
Energiemenge	KWh	7,50					0,10	7,60	

**Elektrische Energie**

<u>Zeitoptimierte</u> Energiemenge neues Verfahren <u>je Stück</u>	KWh	2,71
Energiemenge konventionelles Verfahren <u>je Stück</u>	KWh	7,60

**Energieeinsparung 64%** je Stück

Bezugsgröße für die folgenden Berechnungen sind die zeitoptimierten Prozessparameter

Eingesparte Energiemenge je Stück	KWh	4,89	
CO2 Einsparung je Stück	0,56 kg/KWh	kg	2,74

Die aktuell realistische Stückzahl für dieses dieses Bauteil pro Jahr beträgt 7.000

Eingesparte Energiemenge bei 7.000 Teilen	KWh	34.258,00	
CO2 Einsparung bei 7.000 Teilen	0,56 kg/KWh	kg	19.184,48

Bezogen auf die Maschinenkapazität (2 Schicht Betrieb mit 80 h/Woche und 50 Wochen jährlich) und ca. 12 Teilen / h wäre eine Fertigungsstückzahl von ca. 48.000 Teilen jährlich möglich, da das Demonstratorbauteil in unterschiedlichen Baureihen gefertigt wird und sukzessive auf das neue PECM Verfahren umgestellt werden könnte.

Eingesparte Energiemenge bei 48.000 Teilen	KWh	234.912,00	
CO2 Einsparung bei 48.000 Teilen	0,56 kg/KWh	kg	131.550,72

**Anmerkung:**

1)

Beim konventionellen Verfahren müssten jedoch mehrere Maschinen (oder mehrere Spindeln) verwendet werden, um überhaupt die Stückzahl produzieren zu können, da die reine Bearbeitungsdauer alleine beim Fräsen nahezu das dreifache beträgt (ohne Berücksichtigung des Polierens!). Dies ist hier nicht berücksichtigt, so dass die ermittelten Werte eine sehr konservative Angabe darstellen

2)

Alle Werte beziehen sich auf das Demonstratorbauteil, mit den erfassten Ist-Werten.

Bei anderen Bauteilen (z.B. für Turbinen oder den Luftfahrtbereich), können noch höhere absolute Werte bezogen auf das jährliche Einsparpotential erreicht werden.

Diese hängen dann immer von den konkreten Bauteilen und den akquirierbaren Aufträgen ab.

Wir bewerten die relativen Werte daher als aussagekräftiger und die **Energieeinsparung von 80% je Stück** konnte durch die Versuche **bestätigt werden**