

Programm Lebensgrundlage Umwelt  
und ihre Sicherung (BWPLUS)

Zwischenbericht anlässlich des Statuskolloquiums  
Umweltforschung Baden-Württemberg 2018

19./20. April 2018  
Schwabenlandhalle Fellbach  
Guntram-Palm-Platz 1, 70734 Fellbach

**Stromoptimierte, flexible und residuallastangepasste KWK  
in der elektrochemischen Beschichtungsindustrie  
GalvanoFlex\_BW**

von

Thomas Bernd  
Hochschule Reutlingen

Ekrem Köse  
Universität Stuttgart  
Institut für Energieeffizienz in der Produktion

Peter Schmitt  
Hartchrom GmbH

Cyrus Bark  
C&C Bark Metall-Druckguss und Formenbau GmbH

Karl Rieder  
plating-electronic GmbH

Burkhard Hamer  
NovoPlan GmbH

Förderkennzeichen: BWT17009-17014

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden  
mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

## **Kurzfassung**

In dem vorliegenden Zwischenbericht sind die Arbeiten und Ergebnisse zusammengefasst, die im Rahmen des Projektes GalvanoFlex\_BW während der ersten acht Projektmonate der insgesamt 2½-jährigen Laufzeit durchgeführt und erzielt wurden. Ziel des Projektes ist die Untersuchung und Verbesserung der Energieeffizienz in Industrieunternehmen mit dem speziellen Fokus auf der Einführung stromoptimiert betriebener KWK-Anlagen. Entsprechend des Arbeits- und Zeitplans sind die Literaturrecherche, die Festlegung von Prozessstypen, die Datenerfassung, die Strategieentwicklung zur stromoptimierten KWK, die Optimierung der Schnittstelle zwischen KWK und Gleichrichtern, der Aufbau der Branchenplattform und die sozial-wissenschaftliche Begleitforschung beschrieben. Der aktuelle Projektstand deckt sich dabei im Wesentlichen mit den Vorgaben aus dem vorgelegten Zeitplan.

### **1. Einleitung**

Vor dem Hintergrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung stellt sich die Frage nach einer sicheren und effizienten Abdeckung der verbleibenden Residuallast. Zudem müssen die mittlerweile erreichten Erfolge im Zuge der Energiewende vom Stromsektor auf die Sektoren Wärme und Verkehr übertragen werden. Hier stellt die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – gepaart mit weiteren geeigneten Energieeffizienzmaßnahmen - eine anerkannt geeignete Lösungsmöglichkeit dar. Dazu ist es allerdings erforderlich, die KWK nicht mehr klassisch wärmegeführt, sondern am Strombedarf orientiert zu betreiben.

Dieser Aufgabe widmet sich das vorliegende Forschungsprojekt am Beispiel der Anwendung in der Industrie. Aufgrund des größeren Hebels im Hinblick auf die erreichbare Energieeinsparung und die damit verbundene Kostensenkung, sind dabei energieintensive Betriebe in der Galvanikindustrie, im Fokus des Projektes. Um konkrete und umsetzbare Lösungen für die Praxis anbieten zu können, sind vier Industriepartner eingebunden: ein Technologieunternehmen (plating electronic) und mit den Firmen C&C Bark GmbH, NovoPlan GmbH und Hartchrom GmbH drei Firmen, die als Reallabor fungieren und mit Messdaten sowie mit der Möglichkeit der testweisen Implementierung das Projekt unterstützen. Neben der Bearbeitung technischer Fragestellungen wird eine sozial-wissenschaftliche Begleitforschung durchgeführt. Auf diese Weise sollen eventuelle Barrieren bei der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen erkannt sowie Möglichkeiten zu deren Abbau entwickelt werden.

Der vorliegende Zwischenbericht konzentriert sich auf die Darstellung der Arbeiten im Projekt ab dem Startzeitpunkt am 1.5.2017. Gemäß dem in Antrag vorgelegten Zeitplan sind die Arbeitspakete 1, 2, 3, 5, 6, 10 und 11 involviert. Dem entsprechend konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf diese Arbeitspakete.

### **2. Literaturrecherche, Einführung in das Thema**

Mit dem Ziel aktuelle und zukünftige Entwicklungstrends im Bereich „Energetische Kopplung von KWK-Energieerzeugeranlagen mit Industrieprozess“ zu identifizieren wurde am EEP die einschlägige Fachliteratur aus den Domänen „Galvanotechnik“, „Metalldruckguss“ und „Kraft-Wärme-Kopplung“ einer strukturierten Literaturrecherche unterzogen. Auf diversen Internet-Foren und aus Studien wurden zusätzlich die aktuellen Hemmnisse der Betreiber und Interessenten von KWK-Anlagen analysiert.

Des Weiteren wurden die Prozessschritte innerhalb der Galvanotechnik und dem Metalldruckguss bezüglich ihres energetischen Verbrauchsverhaltens in Haupt- und Peripherieprozesse geclustert.

Das erste Arbeitspaket diente am REZ dazu, grundlegende Fragestellungen zu beantworten und die ersten Schritte im weiteren Projektverlauf zu definieren. Eine Einarbeitung in die Thematik erfolgte dabei zum einem im Bereich Galvanotechnik. Gegenstand waren dort vor allem die Grundlagen der Prozesse, die in diesem Industriezweig angewandt werden. Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz hat einen Leitfaden mit dem Titel „Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie“ veröffentlicht [1]. Dieser beschäftigt sich vor allem mit möglichen Energieeffizienzmaßnahmen und weniger mit den Möglichkeiten zur Energieerzeugung, dennoch konnten dort wichtige Informationen gewonnen werden.

Ein weiterer Teil der Einarbeitung bestand darin, sich mit dem Programm Matlab/Simulink vertraut zu machen. Auf Basis dieses Programmes soll in AP5 das vorhandene Modell genutzt und erweitert werden, um die stromoptimierten KWK-Strategien zu entwickeln.

Nach der ersten Einarbeitung wurde außerdem ein Kick-Off-Meeting veranstaltet, an dem alle Projektpartner teilgenommen haben. Dabei sind die ersten Arbeitsschritte festgelegt und das weitere gemeinsame Vorgehen definiert worden.

### 3. Festlegung von Prozesstypen

Von eiffo wurden exemplarisch drei unterschiedliche Betriebe für das Reallabor ausgewählt. Die verschiedenen Produktionsverfahren und Beschichtungsverfahren führen zu sehr unterschiedlichen Energieverbräuchen für die Beschichtungsprozesse, die Bäder, die Vor- und Nachbehandlungen in Bezug auf Strom und Wärme bzw. Prozesswärme, die in diesem Arbeitspaket im Rahmen von ersten Betriebsbesuchen typisiert wurden. Im Rahmen von persönlichen Gesprächen und durch Zuarbeiten relevanter Daten aus der betrieblichen Praxis haben die Mitarbeiter der Industriepartner zur Festlegung der Prozesstypen beigetragen.

Mit den Firmen Hartchrom GmbH, NovoPlan GmbH und C&C Bark, stehen drei KMUs als Industriepartner zur Verfügung, die eine weite Spanne an verschiedenen Prozesstypen repräsentieren und für eine breite Datenbasis im Hinblick auf die zu entwickelnde Branchen-Plattform sorgen.

Am EEP wurden diese Arbeiten in Zusammenarbeit mit dem IPA sowie eiffo und den Industriepartnern weitergeführt und vertieft. Im Rahmen gemeinsamer Workshops wurden die Prozessschritte auf die generelle Eignung zur Kopplung mit KWK-Anlagen untersucht. Da für die sinnvolle Etablierung von KWK-Anlagen ein thermischer Verbrauch vorhanden sein muss, wurden zunächst alle galvanischen Prozesse qualitativ nach dem thermischen Verbrauch gruppiert. Als zweites Kriterium wurden die elektrischen Verbräuche zur Einordnung herangezogen. Hierbei wurden die unterschiedlichen Prozesse in vier Quadranten eingeordnet (s. Abb. 1).

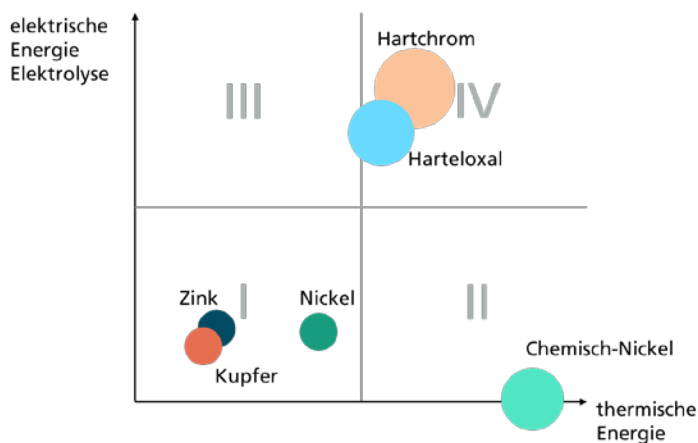


Abbildung 1: Energiebedarfsanalyse galvanotechnischer Prozesse (Darstellung IPA)

Die Hartverchromung und das Harteloxieren befinden sich im vierten Quadranten der Matrix und sind sowohl durch einen hohen thermischen als auch hohen elektrischen Energieverbrauch gekennzeichnet. Für diese beiden Verfahren erscheint der Einsatz der KWK besonders lohnenswert, da sich durch den Umstieg auf eine gekoppelte Erzeugung besonders große Einsparungen im Vergleich zum netzseitigen Energiebezug ergeben. Beide Verfahren kennzeichnen sich durch umfangreiche prozessbedingte Wärmegestehung während des Beschichtungsprozesses. Bei der Hartverchromung

ist dieser Umstand dem als Widerstand wirkenden Elektrolyt geschuldet und beim Harteloxal dem Widerstand der nichtleitenden Schicht. Um konstante Prozessbedingungen zu gewährleisten, muss die entstehende Wärme durch Kühlung abgeführt werden. Hier ergeben sich Möglichkeiten, Kältemaschinen mit Eigenstrom aus dem BHKW zu betreiben oder die hohen Wärmemengen, die bei der KWK erzeugt werden, zur Versorgung von Adsorptionskältemaschinen zu verwenden.

Bei der Hartverchromung wird mit hohen Stromdichten zwischen 20 – 100 A/dm<sup>2</sup> und den sich daraus ergebenden Spannungen zwischen ca. 8 – 15 V gearbeitet. Thermische Energie wird, wie bei allen galvanotechnischen Prozessen, vor allem zur Vorbehandlung (Reinigung) der Bauteile benötigt. Des Weiteren muss vor der Beschichtung der Elektrolyt auf 50 – 60 °C erhitzt werden. Während der Verchromung wird hingegen eine Prozesskühlung benötigt [2]. Der Wärmebedarf richtet sich in diesem

Kontext somit sehr stark nach dem Betrieb der Anlage. Je konstanter die Anlage betrieben wird, desto weniger Wärme muss für den Hartchromelektrolyten aufgebracht werden<sup>1</sup>.

Beim Harteloxieren werden sehr hohe Spannungen bis zu 100 V bei Stromdichten zwischen üblicherweise 2 – 5 A/dm<sup>2</sup> benötigt. Der Elektrolyt muss auf rund 0 °C gekühlt werden, um die typischen Schichteigenschaften von Harteloxalschichten gewährleisten zu können. Wie auch bei der Hartverchromung muss der Prozess daher stark gekühlt werden. Wärme wird wiederum für die Vorbehandlung und das sogenannte Verdichten, ein Nachbehandlungsprozess bei über 90 °C, benötigt [3]<sup>1</sup>.

Einen sehr hohen thermischen Energieverbrauch besitzt die chemische Vernicklung, einem autokatalytischen Prozess, der für eine wirtschaftliche Abscheidungs geschwindigkeit bei Temperaturen um 90 °C betrieben werden muss [4]<sup>1</sup>. Eingeordnet im II. Quadrant ist auch hier der Einsatz von KWK sinnvoll, da hier ganzjährig eine Abnahme thermischer Energie gegeben ist. Durch eine Grundlast an elektrischen Verbrauchern und dem bei Lohnbeschichtern meist vorliegenden Verfahrensmix ist eine hohe Verbrauchsquote des BHKW-Stroms gegeben.

Im I. Quadrant befinden sich galvanotechnische Verfahren wie das Verzinken, das Verkupfern und das Vernickeln, bei denen moderate Temperaturen und vergleichsweise niedrige Stromdichten und Spannungsniveaus unter 10 A/dm<sup>2</sup> respektive 10 V vorliegen [5, 6]<sup>1</sup>. Unternehmen, die hauptsächlich diese Verfahren betreiben, haben entsprechend einen niedrigeren flächenbezogenen Energieverbrauch. Der Betrieb von KWK-Anlagen kann trotzdem sinnvoll sein, wenn auch die Kosteneinsparung absolut gesehen geringer als bei den energieintensiven Verfahren ausfallen.

Der dritte Quadrant, der durch einen hohen elektrischen Verbrauch gekennzeichnet ist, bleibt leer. Für den Betrieb einer KWK-Anlage wäre er aufgrund fehlender Wärmesenken ungeeignet. Dies verdeutlicht, dass die Galvanotechnik als Branche grundsätzlich gut für die Kopplung mit KWK-Energieerzeugeranlagen geeignet ist.

Aufgrund der Energiebedarfsanalyse und der Verfahren, die bei den Projektpartnern eingesetzt werden, wird der Fokus zunächst auf die Hartverchromung und auf das chemische Vernickeln gelegt. Wie bereits dargestellt, ähneln sich die Verfahren Vernickeln, Verzinken und Verkupfern aus energetischer Sicht und werden ebenfalls betrachtet, da deren Marktanteil sehr hoch ist.

Da C&C Bark einen Betrieb außerhalb der Galvanotechnik repräsentiert und damit zur Untersuchung der Übertragbarkeit der zu entwickelnden KWK-Strategien auf andere Branchen zur Verfügung steht, musste hier die Festlegung der Prozesstypen separat erfolgen. Zu diesem Zweck wurden ebenfalls innerhalb eines Workshops die Prozesse identifiziert, welche für die Integration einer KWK-Anlage im Unternehmen relevant sind. Zur Aufteilung wurde dabei auf die Systematik von Frech GmbH zurückgegriffen, die als Anlagenhersteller von Magnesium-Druckguss-Anlagen ein breites Know-how aufweisen können [7]. Dabei wurden folgende Prozesse ausgewählt, die im weiteren Projektverlauf näher untersucht werden sollen:

- Heizungssystem (KWK-Integration)
- Druckluftsystem (DWK-Integration)

Alle weiteren Prozesse eignen sich nicht für die Kopplung mit einer KWK-Anlage, insbesondere aufgrund des erforderlichen hohen Temperaturniveaus.

Eine bislang wenig bekannte Möglichkeit eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage zu etablieren, ist die Druckluft-Wärme-Kopplungsanlage (DWK). Diese Art von KWK erzeugt neben der thermischen Energie nicht Strom, sondern Druckluft [8]. Hier wird durch die chemische Verbrennungsenergie kein Generator angetrieben, der in einem BHKW den Strom erzeugt, sondern es wird direkt ein Verdichter angetrieben, der die benötigte Druckluft erzeugt.

---

<sup>1</sup> Die aus der Literatur entnommenen Parameterbereiche der galvanischen Beschichtungsverfahren können durch die langjährige Projekterfahrung der Abteilung Galvanotechnik des Fraunhofer IPA bestätigt werden. Darüber hinaus fand ein Abgleich der Werte mit einer Vielzahl von Produktdatenblättern statt, die hier im Einzelnen nicht aufgeführt werden.

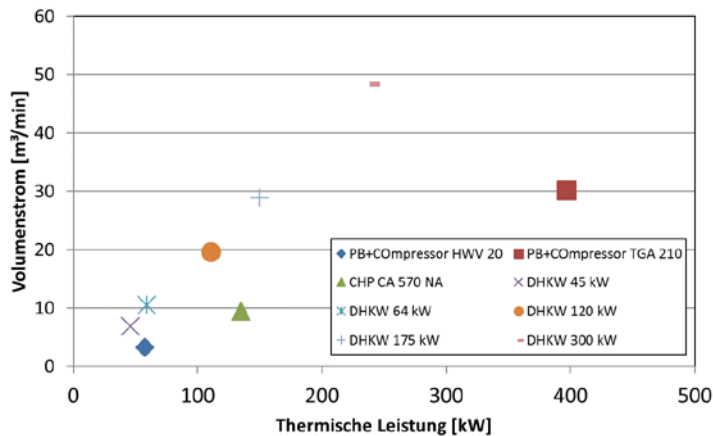


Abbildung 2: Druckluftvolumenstrom in Abhängigkeit der thermischen Leistung

Diese Möglichkeit ist allerdings nur dann empfehlenswert, wenn im Betrieb auch der entsprechende Druckluftbedarf vorherrscht. Abbildung 2 zeigt, welche Druckluftvolumenströme mit welcher thermischen Leistung verbunden sind. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass das Volumen, welches pro Minute erzeugt wird, bei mindestens 3,3 m³/min liegen muss [9-11]. Es können auch Volumenströme von über 48 m³/min bereitgestellt werden. DWKs haben den wesentlichen Vorteil gegenüber BHKWs, dass der Motor durch eine Kupplung direkt mit dem Schraubenverdichter verbunden ist [12]. Dadurch lassen sich Umwandlungs-

verluste, die zunächst am Generator und später am Druckluftkompressor entstehen, vermeiden. Wie eine DWK in den Betrieb eingebunden werden könnte, ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

Die bisher eingezeichneten Energieflüsse von der DWK müssen zunächst bei den Industriepartnern durch Messungen der Druckluftverbräuche verifiziert werden. Unter Umständen kann eine größere DWK mit höherer thermischer Leistung und einer höheren Druckluftherzeugung eingesetzt werden. Innerhalb des Forschungsprojekts muss ebenfalls weiter untersucht werden, welchen Einfluss eine DWK-Anlage energetisch als auch wirtschaftlich auf ein Unternehmen mit hohem Druckluftverbrauch hat. Insbesondere können wirtschaftliche Vorteile gegenüber einem BHKW vorgewiesen werden, da hier keine EEG-Umlage auf eigenerzeugten Strom zu leisten ist [13].

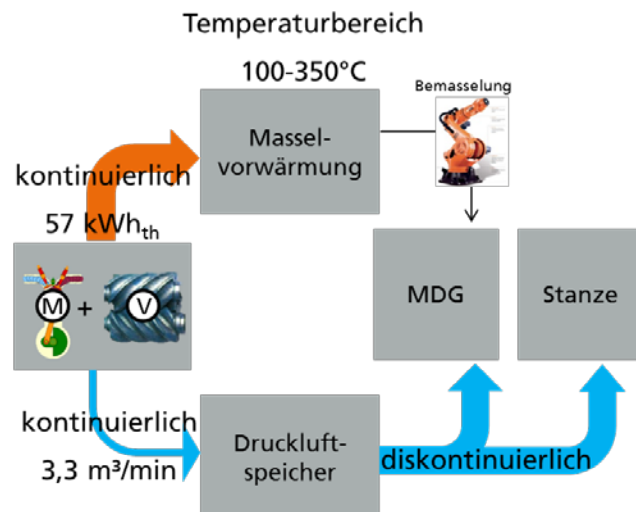


Abbildung 3: Schematische Integration einer DWK

Die Effizienzbewertung widmet sich im weiteren Projektverlauf vordergründig den peripheren Anlagen. Der Betrachtungsfokus liegt hierbei insbesondere auf den Bereichen Lüftungs- und Abluftanlagen, Druckluftherzeugung und Heiz- und Kühlgeräte.

#### 4. Datenerfassung, Datenaufbereitung, Messungen

Für die Planung einer KWK-Anlage und die Erarbeitung von Energieeffizienzmaßnahmen müssen die energetischen Daten eines Unternehmens erfasst werden. Um die Strukturen der im Rahmen der Reallabore angeschlossenen Industriepartner kennenzulernen und die vorhandenen technischen Anlagen in Erfahrung zu bringen, wurde bei allen Teilnehmern (C&C Bark, NovoPlan und Hartchrom) ein Workshop durchgeführt. Vor dem Treffen wurde allen Teilnehmern ein Fragebogen zugesandt. Ziel des Fragebogens war es, Transparenz bezüglich der Verfügbarkeit und Granularität der Datenbasis bei den Partnerunternehmen zu erhalten. Abgefragt wurden unter anderem Details zum individuellen Galvanikprozess sowie den energieerzeugenden und -verbrauchenden Anlagen aus der Prozess- und Gebäudeinfrastruktur. Die Angaben aus dem Fragebogen wurden während einer Werksbegehung verifiziert und vervollständigt.

Auf Grundlage der Begehung und des Fragebogens wurden am EEP in Zusammenarbeit mit dem IPA Messpläne für die einzelnen Partnerunternehmen entwickelt.

Um den Einsatz von stromoptimierter KWK möglichst realitätsnah mit dem Simulationsmodell am REZ abbilden zu können, ist es nötig, dass die Simulation auf einer guten Datengrundlage aufbaut. Konkret werden die Lastgangdaten für Strom und Wärme benötigt. Die Beschaffung dieser Daten war Hauptbestandteil des AP3, während die zugehörigen Aufarbeitung und Konsolidierung der Daten in AP5 fällt. Zu diesem Zweck wurde der von EEP und IPA entwickelte Fragebogen erweitert. Neben den Strom- und Wärmeverbräuchen war die Auflistung aller vorhandener Bäder und Maschinen samt Leistungsangaben und Abmessungen Gegenstand dieser Erweiterung.

Eine erste Messkampagne wurde seitens EEP bei der Firma C&C Bark durchgeführt. Hierbei wurden die elektrischen Verbräuche der Magnesium-Druckguss-Anlagen aufgenommen. Da der thermische Verbrauch der Anlage unter anderem durch Verbrennung von Propan zur Beheizung der Düsen in den Warmkammeröfen entsteht, wird aktuell eine weitere Messkampagne zur Gasdurchflussmessung vorbereitet. Der für die Aufrüstung eines vorhandenen Clamp-on Durchflussmessgeräts notwendige Beschaffungsprozess verzögert aktuell die Finalisierung der Datenerhebung in geringem Umfang.

Zudem wurde analysiert, dass bei der Firma C&C Bark ggf. eine Druckluft-Wärme-Kopplungsanlage von Relevanz sein könnte. Die Quantifizierung der angestoßenen Analyse ist allerdings ebenfalls auf das Clamp-on Durchflussmessgerät angewiesen.

Seitens C&C Bark wurde der von EEP und REZ erstellte Fragebogen beantwortet und zusammen mit weiteren Dokumenten, wie Anlagenplan, Spitzensteuerausgleich-Verordnungsbericht nach Anlage 2 und Aufschlüsselung der Energieträger den wissenschaftlichen Projektpartnern EEP und REZ zur Verfügung gestellt.

Das Unternehmen C&C Bark unterstützte weiterhin aktiv die vom EEP geplante Messkampagne. Hierbei wurden die Stromverbräuche der Druckgussmaschinen, Lüftungs- und Abluftanlagen sowie der Druckluftkompressoren mittels einer Kombination aus mobiler und festinstallierter Messtechnik aufgezeichnet. Eine weitere Messkampagne ist aktuell in der Planung. Diese ist erforderlich um die Druckluftverbräuche besser den einzelnen Anlagen und Maschinen zuzuordnen. Auch diese Messkampagne wird die Instandhaltungsabteilung des Unternehmens C&C Bark aktiv unterstützen.

In begleitenden Telefonkonferenzen wurden über Experteninterviews Information zu Prozessen, wie der Maschinenkühlung und Aufschmelzung der Magnesiummassel mit dem EEP ausgetauscht.

Aus der Beantwortung des Fragebogens seitens der Firma NovoPlan konnte abgeleitet werden, dass aktuell keine registrierende Lastgangmessung (RLM) für den Gasverbrauch vorliegt. Auch hier ist somit weiterer Messbedarf unter Zuhilfenahme des Clamp-on Durchflussmessgeräts erforderlich. Geplant ist deshalb eine Messung des Gasdurchflusses an der Hauptzuleitung für einen Zeitraum von mindestens zwei Wochen. Parallel zur dieser Messkampagne wird der Messplan für NovoPlan finalisiert. Dieser berücksichtigt neben der beschriebenen Messung an der Hauptzuleitung für Erdgas insbesondere die elektrischen Energieverbraucher auf Ebene der Galvanikprozesse sowie der Prozess- und Gebäudeinfrastruktur.

Ziel der messtechnischen Erhebung ist es die in AP4 geplante Analyse der Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz quantitativ bewerten zu können. Dabei sollen allgemeingültige Effizienzmaßnahmen abgeleitet werden. Um den aktuellen Effizienzgrad ermitteln und Alternativen berechnen zu können, sind diese Messungen notwendig.

Beim Projektpartner Hartchrom zeigt sich die vorhandene Datengrundlage ebenfalls als nicht durchgängig. Die Bewertung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz erfordert ebenso wie die Bewertung des Einsatzes von KWK-Technologien zusätzliche messtechnische Erhebungen.

Aktuell werden zu diesem Zweck an der Eingrenzung des Betrachtungsgegenstands am Standort des Industriepartners und der Detailierung des Messplans gearbeitet. Die Messungen sind für Mitte März geplant, so dass die Messkampagnen inklusive Auswertung der Daten in einer vollständigen Übersicht bis Ende April abgeschlossen werden können.

## **5. Entwicklung und Anwendung von Strategien für einen stromoptimierten KWK-Betrieb in der Galvanik**

In einem im Rahmen von BWplus beförderten Vorprojekt (Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement, 2016 [14]) ist am REZ ein Modell entwickelt worden, mit dessen Hilfe die stromoptimierte Betriebsweise eines BHKWs simuliert werden kann. Inhalt der

Arbeiten in Rahmen des vorliegenden Projektes war es nun, dieses Modell weiter zu entwickeln und an die Gegebenheiten der Industriebetriebe anzupassen. Die Funktionsweise des Modells soll an dieser Stelle nur kurz erläutert werden. Genauere Details sind dem Abschlussbericht zum oben genannten Projekt sowie einer daraus entstandenen Veröffentlichung [15] zu entnehmen.

Eingangsgröße für die Fahrplanoptimierung ist eine Prognose für den kumulierten Wärmebedarf über die 24 Stunden des Folgetags. Addiert man zu der so entstehenden Wärmebedarfskurve die thermische Kapazität des Wärmespeichers, so erhält man eine zweite, obere Wärmebedarfskurve, die parallel zur Ausgangs- oder unteren Wärmebedarfskurve verläuft. Zwischen diesen beiden Kurven befindet sich das sogenannte Flexibilitätsband, in dem die KWK-Anlage einzig unter Berücksichtigung der Belange des BHKWs beliebig ein- oder ausgeschaltet werden kann. Unter dieser Randbedingung werden in diesem Bereich eine hohe Anzahl beliebiger Fahrpläne nach dem Monte-Carlo-Verfahren erzeugt. Dabei wird in festen Zeitabständen per Zufall entschieden, ob das BHKW ein- oder ausgeschaltet sein soll. Als Randbedingungen im Hinblick auf die zuvor genannten Belange des BHKWs werden die Mindestlaufzeiten und Mindeststillstandzeiten für das BHKW definiert, die eingehalten werden müssen. Ebenso muss der Fahrplan in jedem Fall im Bereich zwischen den beiden Wärmebedarfskurven verlaufen. Anschließend werden alle mit Hilfe des Monte-Carlo-Verfahrens generierten Fahrpläne hinsichtlich der erzielten Eigenstromdeckung auf Basis des Stromlastgangs ausgewertet. Aus den zehn besten Fahrplänen wird dann derjenige ausgewählt, bei dem das BHKW die wenigsten Starts aufweist. Weniger Starts erhöhen den Gesamtwirkungsgrad des BHKWs und wirken sich positiv auf die Lebensdauer aus. Die Simulation wird in Matlab/Simulink ausgeführt.

Aus dieser Beschreibung wird deutlich, dass zur Durchführung der Simulation die Strom- und Wärmelastgänge der Industriepartner benötigt werden und deshalb mit Hilfe des Fragebogens im Rahmen von AP3 abgefragt wurden. Von den Firmen C&C Bark und NovoPlan wurden die Stromlastgänge von 2016 in ¼-Stundenwerten zurückgemeldet. Im Bereich Wärme stand jedoch nur jeweils der jährliche Gesamtwärmebedarf zur Verfügung. Zur Bestimmung der Lastprofile sind deshalb die in AP3 beschriebenen weiteren Messkampagnen geplant. Vorab ist unter Verwendung des Jahreswärmebedarfs in Verbindung mit dem entsprechend skalierten Standardlastprofil GMK des Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft [16] für die beiden Industriepartner C&C Bark und NovoPlan je ein Lastprofil erstellt und für die Simulation verwendet worden.

Auf dieser Basis wurden erste Rechnungen durchgeführt, um Erkenntnisse über das Potential einer stromoptimierten Betriebsweise in den beiden Firmen zu erlangen. Dabei sind sowohl unterschiedliche BHKW-Größen als auch verschiedenen Pufferspeichergößen betrachtet worden.

Die Auswertung der Ergebnisse für die Fa. C&C Bark ist in Abbildung 4 dargestellt. Die aufgetragenen Energiekosteneinsparungen beziehen sich auf die Option, Strom und Wärme getrennt zu erzeugen, d.h., Strom aus dem Netz zu beziehen und Wärme im Gaskessel zu erzeugen, wobei durchschnittliche Industriepreise für Strom und Gas in Höhe von 17,2 ct/kWh<sub>el</sub> [17] und 4,5 ct/kWh(H<sub>s</sub>) [18] angesetzt sind. Für das BHKW sind Stromerlöse nach KWKG, Gaskosten sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung hinterlegt; Kapitalkosten sind dagegen nicht enthalten.

Die linke Säule (rot) zeigt die wärmegeführte Betriebsweise eines 70 kW<sub>el</sub> BHKWs, und es ist ersichtlich, dass der Einsatz eines BHKWs bereits in diesem Fall finanzielle Vorteile in Höhe von 3,6% ergibt. Betreibt man das BHKW stromoptimiert, zeigen sich höhere Einsparungen gegenüber dem wärmege-

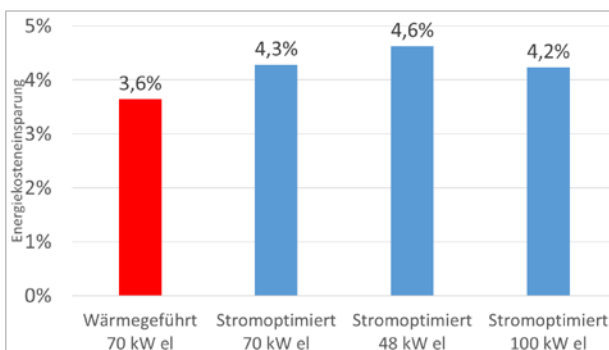


Abb. 4: Vergleich verschiedener stromoptimierter BHKW mit der wärmegeführten Betriebsweise bei der Firma C&C Bark

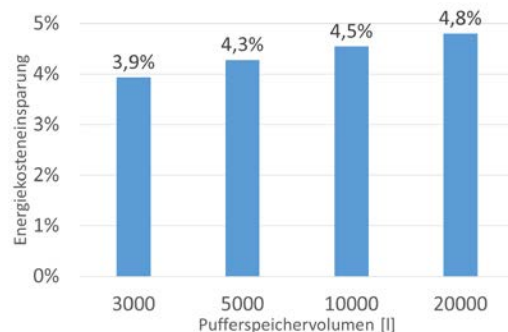


Abb. 5: Pufferspeichervariationen für ein 70 kW<sub>el</sub> BHKW bei Firma C&C Bark

fürten Betrieb, wie die blauen Säulen zeigen. Verringert man die Leistung des BHKWs auf 48 kW<sub>el</sub> steigen die Einsparungen auf 4,6% an, während ein BHKW mit 100 kW<sub>el</sub> nur Einsparungen von etwa 4,2% im stromoptimierten Betrieb zeigt.

Die Größe des Pufferspeichers beträgt bei den in Abb. 4 dargestellten Systemen jeweils 5.000 Liter. Interessant ist die Abhängigkeit dieser Ergebnisse von der Größe des Pufferspeichers. Zu diesem Zweck zeigt Abbildung 5 die Verhältnisse für das BHKW mit 70 kW<sub>el</sub> in Verbindung mit Pufferspeichern mit 3.000, 5.000, 10.000 und 20.000 Litern Inhalt. Es ist deutlich erkennbar, dass bei Zunahme des Puffervolumens die errechneten Einsparungen ansteigen. Je größer der Speicher ist, desto kleiner fällt dieser Vorteil allerdings aus.

Obwohl der Vorteil der stromoptimierten Betriebsweise deutlich wird, sind die erreichbaren Einsparungen durch den Einsatz eines BHKWs insgesamt jedoch auf einem niedrigen Niveau, was daran festzumachen ist, dass der Jahresstrombedarf bei C&C Bark etwa 4,5-fach höher ist als der Jahreswärmebedarf. Der Beitrag eines BHKWs ist deshalb eher klein, und es sollte vor Einsatz eines BHKWs geprüft werden, ob der Einsatz von Stromheizungen durch BHKW-Wärme ersetzt werden kann.

Bei der Firma NovoPlan liegen genau umgekehrte Verhältnisse vor; hier übersteigt der Jahreswärmebedarf den Jahresstrombedarf um ca. das 3-fache. Deshalb ist der Einsatz eines BHKWs hier lohnender, und dem entsprechend tritt der Unterschied zwischen stromoptimiertem und wärmegeführtem Betrieb deutlicher hervor, wie Abb. 6 für ein BHKW mit 250 kW<sub>el</sub> und einem Pufferspeicher mit 10.000 Litern Volumen zeigt. Hier steigen die Energieeinsparung vom wärmegeführten BHKW-Betrieb mit 11,9% auf 15,7% bei gleichem BHKW an. Die noch einmal deutlich höheren Einsparungen für das BHKW mit 100 kW<sub>el</sub> (3. Säule von links) entstehen dadurch, dass BHKW bis einschl. 100 kW<sub>el</sub> den KWK-Zuschlag für selbst genutzten Strom erhalten. Aus diesem Grund ist das 100 kW<sub>el</sub> BHKW gegenüber den größeren Varianten im Vorteil.

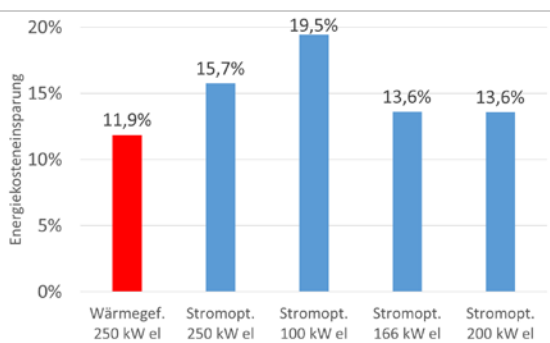


Abb. 6: Vergleich verschiedener stromoptimierter BHKW mit der wärmegeführten Betriebsweise bei der Firma NovoPlan

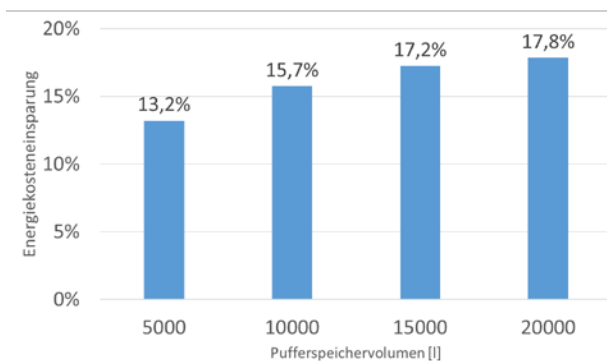


Abb. 7: Pufferspeichervariationen für ein 250 kW<sub>el</sub> BHKW bei Firma NovoPlan

In einer weiteren Simulationsreihe wurde auch hier die Größe des Pufferspeichers variiert (s. Abb. 7). Eine Steigerung des Pufferspeichervolumens von 5.000 auf 10.000 Liter ergibt ein Plus von 2,5 Prozentpunkten im Jahr. Eine Erhöhung von 15.000 auf 20.000 Liter bewirkt dagegen nur noch eine Steigerung von 0,6 Prozentpunkten. Ziel im weiteren Projektverlauf wird es daher sein, die Pufferspeichergröße und die damit verbundenen Investitionskosten abzuwägen und dadurch die optimale Größe zu finden.

## 6. Optimierung der Schnittstelle von stromoptimierter KWK-Anlage und Galvanik-Gleichrichter

Im Rahmen von AP6 sollen Möglichkeiten untersucht werden, die Energieeffizienz zu steigern, indem die stromoptimierte KWK, der oder die Gleichrichter und die Anlagensteuerung intelligent miteinander vernetzt werden.

Zu Beginn dieses Arbeitspakets wurde ein Workshop bei der plating electronic GmbH durchgeführt, an dem neben dem REZ auch die anderen Projektpartner teilgenommen haben. Diskutiert wurden dabei der aktuelle Stand der Technik in Sachen Gleichrichtertechnik und unterschiedliche Strategien, um ein BHKW intelligent einzubinden. Dabei entstand die Idee, mit dem BHKW direkt Gleichstrom zu er-



zeugen. Üblicherweise wird vom BHKW Wechselstrom produziert. Die direkte Erzeugung von Gleichstrom hätte den Vorteil, die anfallenden Umwandlungsverluste beim Transferieren der verschiedenen Stromarten zu eliminieren. Zu diesem Punkt wurden am REZ weitere Recherchen durchgeführt. Daraus hat sich ergeben, dass die direkte Erzeugung von Gleichstrom voraussichtlich nicht wirtschaftlich ist, da Gleichstromgeneratoren Bürsten zur Stromabnahme besitzen, die aufgrund des dauerndem schleifenden Kontakts einem erhöhten Verschleiß unterliegen. Dennoch soll dieser Aspekt nicht sofort verworfen werden, sondern Vor- und Nachteile im Rahmen weiterer Recherchen genauer gegeneinander abgewogen werden. In naher Zukunft ist ein weiteres Treffen mit plating electronic geplant, bei dem vor allem die optimale Einbindung von BHKW in Galvanikbetriebe detaillierter diskutiert wird. Hier könnte u.a. der von plating electronic verfolgte Ansatz einer modularen Bauweise der Gleichrichter im Zuge einer Optimierung der KWK-Betriebsweise vorteilhaft sein, bei dem es möglich sein wird, einzelne Gleichrichtermodule bei höherer oder geringerer Auslastung zu- oder abzuschalten. Dies erscheint insbesondere in Verbindung mit der von den Firmen DiTEC und Softec vorgeschlagenen Einbindung von Daten aus der Prozesssteuerung und der Produktionsplanung interessant im Hinblick auf die Verbesserung der Energieeffizienz.

## 7. Aufbau der Branchenplattform, Einbindung der Akteure

Ein Schwerpunkt des Projektes GalvanoFlex\_BW liegt auf der Einbindung der beteiligten Industrie in Baden-Württemberg, um den Transfer bestmöglich vorzubereiten und einzuleiten. Dazu wird eine Branchenplattform aufgebaut, die die gewonnenen Erkenntnisse in allgemeiner Form aufbereitet und für die Branche zugänglich macht. Zur inhaltlichen Vorbereitung wurden hierfür weitere relevante energietechnische Konzepte und Entwicklungen identifiziert, die eine effiziente und breitenwirksame Umsetzung der stromoptimierten Kraft-Wärme-Kopplung in der Oberflächentechnik unterstützen. Zur organisatorischen Vorbereitung wurden Gespräche mit Branchenverbänden und Meinungsführern der Branche geführt; insbesondere der ZVO Zentralverband Oberflächentechnik sowie Vecco e.V. (ein Zusammenschluss vorwiegend industrieller Beschichtungsbetriebe) konnten wie vorgesehen für eine Kooperation gewonnen werden.

Am 16. Januar 2018 konnte sodann mit Unterstützung dieser Verbände ein Arbeitskreis „Flexible Energieversorgung und effiziente Energietechnik in der Galvanotechnischen Industrie“ konstituiert werden. Darin sollen neben den KWK-spezifischen Informationen auch Informationen zu ergänzenden und unterstützenden Energieeffizienztechnologien erarbeitet und im weiteren Verlauf Handlungsempfehlungen diskutiert werden. Zahlreiche Kontakte zu Firmen in Baden-Württemberg wurden hergestellt und über Fachverbände und das Fachmagazin WOMAG eingeladen.

Die erste Sitzung des Arbeitskreises mit 38 Teilnehmern fand am 16.01.2018 am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart statt. Im Rahmen des technologiebezogenen Teils der Veranstaltung gab es Referate zu den Themen: „Potential von Redox-Flow-Batterien für die Galvanotechnik am Beispiel der Vanadium Redox-Flow-Technik“, Referent Dr. Peter Fischer vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, „Potential eines Gleichstromnetzes für die Galvanotechnik – erste Erfahrungen des Forschungsprojekts „DC Industrie““ von Sebastian Weckmann vom Fraunhofer IPA, „Energieeinsparung mit modernen Gleichrichtern - Potenzial in Verbindung mit Eigenstromerzeugung und Gleichstrombetrieb“ plating-electronic GmbH und wertvolle Erfahrungsberichte aus der industriellen Praxis von Matthias Enseling, Hartchrom GmbH, zur Eigenstromerzeugung mit KWK, ebenso von Sven Reimold, Strähle Galvanik GmbH und Klaus Staudt, Staudt GmbH. Weitere Einzelheiten zu dem Treffen sind in einem 3½ Seiten langen Artikel in der WOMAG, Ausgabe 3/2018 zusammengestellt [19].



Abbildung 8: Eindrücke vom GalvanoFlex-Industrieworkshop am 16. Januar 2018 in Stuttgart

Weiterer wesentlicher Bestandteil der Projektarbeiten der ersten Sitzung war die gemeinsame Weiterentwicklung des Konzeptes des Arbeitskreises und die Diskussion von Interessenschwerpunkten sowie die Bildung weiterer Projektgruppen. Regelmäßige Treffen und ein regelmäßiger Austausch relevanter Informationen wurden vereinbart. Geplanter nächster Termin ist Dienstag, der 5 Juni, anlässlich der internationalen Fachmesse für Oberflächen & Schichten „SurfaceTechnology Germany“ auf dem Messegelände in Stuttgart

Das EEP hat den Aufbau der Branchenplattform unterstützt und für den ersten Arbeitskreis die Organisation der Veranstaltungsräumlichkeiten übernommen und sich bei der Planung der Agenda eingebracht. Zudem wurden weitere interessierte Partner eingeladen. Beim Treffen selbst wurde ein Vortrag über die Relevanz von Flexibilität in der Zukunft und über Energieeffizienzpotenziale in der Peripherie gehalten. Das Fraunhofer IPA hat sich beim Aufbau der Branchenplattform in Form eines Vortrags zu Grundlagen des Energiebedarfs galvanotechnischer Prozesse und zu Energieeffizienzmaßnahmen eingebracht. Des Weiteren hat das IPA an der Themenauswahl für die Veranstaltung mitgewirkt. In gleicher Form hat auch das REZ mitgewirkt. Neben einem Vortrag zur stromoptimierten KWK wurden insbesondere die Kontakte am REZ zur KWK-Branche genutzt, um sowohl weitere Teilnehmer als auch Referenten für die Veranstaltung zu gewinnen. Des Weiteren wurde seitens des REZ die Thematik der Speichertechnologie eingebracht, die für einen flexiblen und stromoptimierten KWK-Betrieb unerlässlich ist.

Das Unternehmen C&C Bark konnte bei diesem ersten Treffen auf Grund einer wichtigen Messepräsenz nicht anwesend sein. Für das nächste Treffen ist die Teilnahme jedoch fest eingeplant. Im Sinne einer verstärkten Breitenwirkung der Projektinhalte und -ergebnisse bewirbt C&C Bark aktiv die Teilnahme an zukünftigen Arbeitskreisen bei Kunden und Partnern mit Interesse an der Kopplung von BHKW und anderen KWK-Anwendungen mit Industrieprozessen. Ziel ist es neben Galvanikunternehmen auch Unternehmen anderer Branchen, das Potenzial einer stromgeführten KWK über die Branchenplattform zugänglich zu machen.

## **8. Unterstützende sozialwissenschaftliche Organisationsanalyse**

Seitens des REZ ist die Datengenerierung mittels Beobachtungen und qualitativen Gesprächen jeweils vor Ort mit bzw. in den einzelnen Unternehmen erfolgt. Gespräche wurden mit unterschiedlichen Personen in den Unternehmen geführt – sowohl mit den Geschäftsführern, als auch mit im weiteren oder im engeren Sinne in Energieeffizienzmaßnahmen involvierten Personen. Die Unternehmen C&C Bark, NovoPlan und Hartchrom stellten dabei sich und Ihre Mitarbeiter zur Verfügung und sorgten für die Koordinierung und Organisation.

Die Unternehmen und die involvierten Personen in ihrem jeweiligen Kontext kennen zu lernen, war das allgemeine Ziel der ersten Phase in AP11. Cursorisch seien einige der Fragen genannt, die dabei im Fokus standen: Welche Bedeutung haben ein BKH, aber auch andere Energieeffizienzmaßnahmen für die einzelnen Unternehmen aktuell? Welche Erwartungen stellen die Unternehmen an das Gesamtprojekt? Die Auswertung der generierten Daten erfolgte mittels Systemanalyse.

Die drei stattgefundenen Vor-Ort-Treffen, welche die Unternehmen organisierten und die dazu dienten, allen beteiligten Projektpartnern einen Einblick in die einzelnen Unternehmen geben zu können, wurden ebenfalls in die Datengenerierung miteinbezogen.

## **9. Zeitlicher Status des Projektes**

Abbildung 9 zeigt den geplanten Projektablauf für die einzelnen Arbeitspakete, wobei der aktuelle Berichtszeitraum (8 Monate vom 1.5.2017 – 31.12.2017) weiß und die zukünftige Bearbeitungszeit grau markiert sind.

Literaturrecherche und Einarbeitung sind seitens des EEP abgeschlossen, es besteht kein zeitlicher Verzug. Ebenso wurde der Zeitplan bei diesem Arbeitspaket am REZ eingehalten. Die Prozesse sind durch EEP und IPA festgelegt und der Meilenstein ist abgeschlossen. Ebenso haben eiffo und die Industriepartner die Prozessauswahl unterstützt und somit dazu beigetragen, dieses AP planmäßig abzuschließen.

Die Messkampagnen werden sich etwas verzögern, da das Upgrade des Messmittels zur Bestimmung des Durchflusses in der Erdgaszuleitung der Unternehmen länger dauert als gedacht. Zudem haben die Rückläufe der Fragebögen ebenfalls mehr Zeit in Anspruch genommen als erwartet, sodass die Erstellung des Messplans länger gedauert hat.

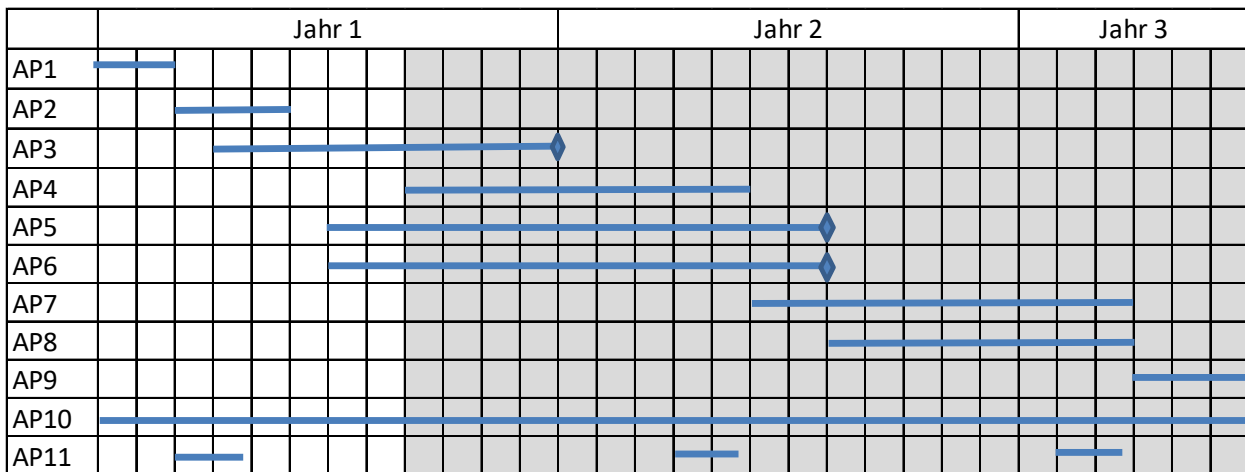


Abbildung 9: Verlauf der Arbeitspakete im Berichtszeitraum

Laut Zeitplan sollten im bisherigen Projektzeitraum 2 PM am REZ für das Arbeitspaket 5 aufgewendet werden. Aufgrund der vorhandenen Datengrundlage konnten in diesem Bereich allerdings schon einige Arbeitsschritte vorgezogen und das vorhandene Modell zeitnah angepasst werden. Aus diesem Grund ist die Entscheidung gefallen, in dieses Arbeitspaket mehr Zeit zu investieren als geplant. Dieser zeitliche Mehraufwand konnte in AP 3 eingespart werden, da zum einen die Strombedarfsdaten von den Industriepartnern in direkt verwertbarer Form zur Verfügung gestellt wurden und zum anderen die Aufnahme der Gasverbräuche noch nicht in Angriff genommen werden konnten.

Das AP6 startete laut Zeitplan erst gegen Ende des Berichtszeitraum, so dass mit dem Workshop bei plating electronic unter Beteiligung des REZ und der übrigen Partner sowie der zugehörigen Vor- und Nachbereitung das Arbeitspaket im Zeitplan ist. AP 10 „Aufbau der Branchenplattform, Einbindung der Akteure“ verläuft projektbegleitend über die gesamte Laufzeit. Die Arbeiten sind im Plan. Hinsichtlich der in drei Intervallen angelegten sozialwissenschaftlichen Begleitforschung (AP 11) ist die erste Phase dem Zeitplan entsprechend abgeschlossen.

## 10. Fazit, Ausblick

Das Projekt befindet sich mit Ausnahme der Datenaufnahme im Zeitplan. Auf Basis der vorliegenden Stromlastprofile konnten mit Hilfe von Standardlastprofilen für den Wärmebedarf erste Simulationen im Hinblick auf einen stromoptimierten BHKW-Betrieb in Industrieunternehmen durchgeführt werden, welche die Vorteile dieser Betriebsart andeuten. Sobald die konkreten Gasverbräuche aus den Messdaten der verbundenen Unternehmen vorliegen, können daraus die tatsächlichen Wärmelastprofile abgeleitet werden. Zusammen mit der derzeit in Arbeit befindlichen Erweiterung des Simulationsprogramms zur Berechnung von BHKW mit Leistungsmodulation, wird im Laufe dieses Jahres eine wesentlich genauere Untersuchung des stromoptimierten Betriebs von KWK-Anlagen möglich sein. Ausgehend von den außerdem geplanten Einzelmessungen an ausgewählten Energieverbrauchern in den Unternehmen, wird zudem die Analyse weiterer Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz durchgeführt. Hier hat sich zudem gezeigt, dass ein Abgleich dieser Einzelmessungen mit dem Simulationstool AnyLogic, mit dessen Hilfe die Prozesse derzeit am EEP nachgebildet werden, dazu führen kann, einen Generator für synthetische Lastprofile im Industriebereich zu entwickeln. Dies wäre ein erheblicher Mehrwert, der branchenübergreifend und damit allgemein wirken könnte, da derartige Lastprofilgeneratoren bislang nur für Wohngebäude bekannt und nutzbar sind.

Durch den Industrieworkshop am 16. Januar 2018 ist zudem erreicht worden, das Projekt einem breiteren Kreis bekannt zu machen, und es wurden eine ganze Reihe von Anregungen aus dem Kreis der anwesenden Industrievertreter aufgenommen, die im weiteren Projektverlauf genauer analysiert und davon ausgehend eventuell weiterverfolgt werden. Seitens der Firmen bestand großes Interesse, den Workshop zum Gedankenaustausch in Sachen KWK und Energieeffizienz in der Industrie zu verstetigen. Dem entsprechend ist bereits ein zweiter Termin am Rande der Messe „SurfaceTechnology Germany“ am 5. Juli in Stuttgart vereinbart worden.

## 11. Literaturverzeichnis

- [1] Hensler, G., Hochhuber, J., Hasler, J., Kreisel, R., Seßler, B., Beyer, K., Lips, G., Böck, T., Koch, R. (2003): „Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie“; Bayrisches Landesamt für Umweltschutz
- [2] Lausmann, Günther A.; Unruh, Jürgen N. M. (2006): Die galvanische Verchromung. Mit 66 Tabellen. 2., komplett überarb. Aufl. Bad Saulgau: Leuze (Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung, 35).
- [3] Jelinek, Thomas W. (1997): Oberflächenbehandlung von Aluminium. Mit 159 Tabellen. Saulgau/Württ.: Leuze.
- [4] Riedel, Wolfgang (1989): Funktionelle chemische Vernicklung. Saulgau/Württ.: Leuze (Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung, 20).
- [5] Jelinek, Thomas W. (1997): Praktische Galvanotechnik. Ein Lehr und Handbuch; mit 93 Tabellen im Text, einem speziellen Tabellenteil. 5., erw. und neue überarb. Aufl. Saulgau/Württ.: Leuze (Lehrbuchreihe Galvanotechnik).
- [6] Jelinek, Thomas W. (2003): Galvanische Verzinkung. Elektrolyte, Nachbehandlung, Anwendung; mit 74 Tabellen. 1. Aufl. Bad Saulgau: Leuze (Schriftenreihe Galvanotechnik und Oberflächenbehandlung).
- [7] Oskar Frech GmbH & Co. KG: „Den richtigen Hebel finden – Verbraucheranalyse in der Druckgießerei“. (2015). Online verfügbar unter: <http://www.frech.com/news-reader/den-richtigen-hebel-finden-verbraucheranalyse-in-der-druckgiesserei.html>
- [8] American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE): „Combined Heat and Power and Clean Distributed Energy Policies“. (2009). Online verfügbar unter: <http://aceee.org/topics/combined-heat-and-power-chp>
- [9] Postberg + Co. GmbH: „Druckluft-Wärme-Kraftwerk“. O.J.. Online verfügbar unter: <http://www.postberg.com/druckluft-waerme-kraftwerk/20-kw-pb+compressor-hwv20>
- [10] Bosch KWK Systeme GmbH: „Druckluft-Wärme-Kraftwerk – CHP CA 570 NA“. (2017). Online verfügbar unter: [https://www.bosch-kwk.de/files/20170222\\_Druckluft-Waerme-Kraftwerk\\_Datenblatt\\_DE\\_DE.pdf](https://www.bosch-kwk.de/files/20170222_Druckluft-Waerme-Kraftwerk_Datenblatt_DE_DE.pdf)
- [11] altAIRnative GmbH: „DHKW-Anlagen“. (2017). Online verfügbar unter: <http://www.altairnative.de/dhkw-anlagen/technische-daten>
- [12] Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH: „Druckluft erzeugen ohne Strom“. (2015). Online verfügbar unter: <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/alle/detail/druckluft-erzeugen-ohne-strom-111911>
- [13] BHKW Infozentrum GbR: „Änderung bei der EEG-Umlage wird KWK-Anlagen ausbremsen“. (2017). Online verfügbar unter: [https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/32921\\_Aenderung-bei-der-EEG-Umlage-wird-KWK-Anlagen-ausbremsen.html](https://www.bhkw-infozentrum.de/bhkw-news/32921_Aenderung-bei-der-EEG-Umlage-wird-KWK-Anlagen-ausbremsen.html)
- [14] Lödige, D., Thomas, B., Widmann, C. (2016): „Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement“, Abschlussbericht
- [15] Widmann, C., Lödige, D., Toradmal, A., Thomas, B. (2017): „Enabling CHP units for electricity production on demand by smart management of the thermal energy storage“, Applied Thermal Engineering 114, S. 1487–1497
- [16] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2016), Abwicklung von Standardlastprofilen Gas, Standardlastprofil GMK
- [17] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Strompreisanalyse Januar 2018. Online verfügbar unter: [https://www.bdew.de/media/documents/180109\\_BDEW\\_Strompreisanalyse\\_Januar\\_2018.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/180109_BDEW_Strompreisanalyse_Januar_2018.pdf) (Zugriffsdatum: 06.03.2018)
- [18] Gaspreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland, statista (2018). Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe-und-industriekunden-seit-2006/> (Zugriffsdatum: 06.03.2018)
- [19] WOMAG, Fachzeitschrift für Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche: „Flexible Energieversorgung und effiziente Energietechnik in der galvanotechnischen Industrie“ Ausgabe 3/2018