

Rubrik: Energieeffizienz, Simulation, Steuerungen

# Stromoptimierte KWK in der Galvanikbranche

Der steigenden **Energiefluktuation** durch residuallast-angepasste KWK entgegenwirken

Autoren: E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle, P. Schwanzer

M.Sc. Ekrem Köse, Prof. Dr. Alexander Sauer  
Universität Stuttgart – Institut für Energieeffizienz in der Produktion  
Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart  
Tel. +49 (0)711 / 970-3624 oder -1017  
E-Mail: ekrem.koese@eep.uni-stuttgart.de, alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de  
Internet: <http://www.eep.uni-stuttgart.de/>

Prof. Dr. Bernd Thomas, M.Sc. Tobias Müller  
Reutlingen Research Institute – Hochschule Reutlingen, Reutlinger Energiezentrum (REZ)  
Alteburgstraße 150, D-72762 Reutlingen  
Tel. +49 7121 271 7041 oder -1443  
E-Mail: bernd.thomas@reutlingen-university.de, tobias.mueller@reutlingen-university.de  
Internet: <https://www.reutlingen-university.de/de/forschung/lehr-und-forschungszentren/reutlinger-energiezentrum/>

Dipl.-Ing. Stefan Kölle, Dipl.-Ing. Peter Schwanzer,  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart  
Tel. +49 (0)711 / 970-1786 oder -1209  
E-Mail: stefan.koelle@ipa.fhg.de, peter.schwanzer@ipa.fhg.de oder  
Internet: [www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

## *Inhalt*

Das Thema Energieflexibilität und Anpassung der eigenerzeugten Energie an die Energieerzeugung aus regenerativen Energien gewinnt an Bedeutung. Regulierbare Eigenerzeugungsanlagen können zur Stabilisierung des Netzes einen enormen Beitrag leisten. Dieser Aufsatz zeigt, welchen Effekt der Einsatz von BHWK auf die Galvanikbranche hat und wie nicht nur die eigenen Energiekosten reduziert, sondern auch die Möglichkeit geschaffen wird, auf Signale der Energiewirtschaft zu reagieren, ohne die Energieversorgung zu unterbrechen.

***Power-optimized Combined Heat and Power for the electroplating industry – Respond to increasing energy flexibility by residual energy adapted combined heat and power plants***

## *Abstract*

*Energy flexibility and adaptation of self-generated energy to energy production from renewable energies is becoming more important. Adjustable distributed power plants can provide a huge impact for stabilizing the power grid. This article displays the effects of using combined heat and power generation on the electroplating industry. It demonstrates how energy costs can be reduced, and furthermore how the possibility can be created to respond to signals of the energy industry without interrupting the energy supply.*

## 1 Einleitung und Überblick

Im Jahr 2017 wurden 36,1 % des verbrauchten Stroms von erneuerbaren Energien abgedeckt. Insbesondere der Anstieg an Windkraft konnte in den letzten Jahren ein enormes Wachstum

verzeichnen. Diese Energien unterliegen allerdings einer gewissen Fluktuation, da die Verfügbarkeit nicht vollumfänglich vorhersehbar ist. Die Volatilität des deutschen Strommarktes an der EEX (European Energy Exchange) verzeichnete im Jahr 2017 so viele Negativpreis-Stunden wie noch nie, was unter anderem der fluktuierenden Energieerzeugung aus erneuerbaren Energien geschuldet ist. [1] Um den flexiblen Strommarkt zu unterstützen und gleichzeitig die Energiekosten von Unternehmen zu reduzieren, wird in diesem Beitrag eine residuallast-optimierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vorgestellt. Durch das Abschalten in Zeiten, in denen zu viel regenerativer Strom im Netz vorhanden ist und durch das Einschalten in Zeiten, in denen eine geringe Einspeiseleistung dargebotsabhängiger Erzeuger vorliegt, sollen Residuallastschwankungen ausbalanciert werden. Die Energieversorgung der Unternehmen wird dabei nicht unterbrochen.

In Kapitel 2 werden die Rahmenbedingungen der Energieflexibilität, der Stand der Forschung und die Notwendigkeit einer residuallast-angepassten Fahrweise von KWK erläutert. In den folgenden Kapiteln werden die Funktionsweise eines residuallast-angepassten Blockheizkraftwerks (BHKW) und das Anwendungsgebiet der Galvanikbranche beschrieben sowie Potenziale ausgegeben und die galvanischen Prozesse eingeordnet. Zuletzt werden der weitere Forschungsbedarf und ein Ausblick vorgestellt.

## 2. Energieflexibilität

Grundsätzlich kann eine Stabilisierung des Netzes und die Gewährleistung der Versorgungssicherheit unter anderem durch Abschaltung von regenerativen Anlagen oder durch den Bezug von Regelenergie sichergestellt werden. Die Abschaltung und auch die Nutzung von Regelenergie sind mit Kosten verbunden, welche von den Betreibern der Übertragungsnetze getragen und in den Netzentgelten eingepreist werden.

Die Vorhaltung von Sekundärregelenergie und Minutenreserven kostete die Übertragungsnetzbetreiber im Jahr 2016 circa 123,8 Millionen Euro. Dabei betrug die eingesetzte Energiemenge circa 1,4 TWh für positive Sekundärregelenergieleistung und 0,7 TWh für negative Sekundärregelenergieleistung. Die abgerufene Energiemenge für Minutenregelenergieleistung betrug in Summe 0,228 TWh. Die Redispatch-Maßnahmen, also die Erhöhung oder Reduzierung von Kraftwerken nach vertraglicher Vereinbarung, beliefen sich im selben Zeitraum auf 11,475 TWh beziehungsweise 220 Millionen Euro. Das Abschalten von erneuerbaren Energien, Grubengas- und KWK-Anlagen wird Einspeisemanagement genannt. Nach dem Rekordjahr 2015, in welchem 4,722 TWh abgeregelt wurden, ist die Ausfallarbeit im Jahr 2016 auf 3,743 TWh gesunken [2].

Tendenziell sind die Kosten für die Regulierung des Netzes gesunken. Die Regelung der Energieerzeugung und auch das Lastmanagement auf der Verbraucherseite werden mit weiterem Anstieg der erneuerbaren Energien jedoch weiter an Bedeutung gewinnen. Insgesamt gibt es vier Flexibilitätsoptionen. Drei der bereits genannten Optionen sind „Regelung der Erzeugung“ oder der Wechsel des Energieträgers, „Regelung der Übertragung“ und „Steuerung des Verbrauchs“. Die letzte dieser Optionen ist die „Speicherung von Energie“. [3, 4]

Es gibt bereits BHKW, die entsprechend der Strompreise der Strombörse in Leipzig (EEX) ihre Leistung auf dieser Plattform verkaufen und somit ihren Gewinn aus dem Verkauf von Energie maximieren [5]. Erneuerbare Energien und KWK-Anlagen nehmen ebenfalls aktiv am Regelenergiemarkt teil. Untersuchungen zeigen, dass BHKW in Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes leisten können – auch in Abhängigkeit zukünftiger Ausbauszenarien [6]. Diese Anlagen, die ihre Leistung entsprechend den Anforderungen auf dem Regelenergiemarkt hochfahren oder herunterdrosseln können, bieten die produzierte Energie im Gebäudemanagement oder mithilfe von E-Heizern an [6, 7].

Das Forschungsvorhaben „GalvanoFlex\_BW“ hat das Ziel, die Eigenenergieerzeugung eines produzierenden Unternehmens zu optimieren, indem der Wärme- und Stromverbrauch der Produktion durch die Energieerzeugung von einem BHKW kostenoptimal gedeckt und zusätzlich die maximale Leistung zur Netzstabilisierung bereitgestellt wird. Dieser Beitrag zeigt den ersten Schritt zur kostenoptimalen Erzeugung durch Maximierung des Eigenstromanteils und Reduzierung der Spitzenlast – ohne dabei die Medienversorgung zu unterbrechen.

## 3. Residuallast-angepasstes BHKW

Derzeit werden BHKW meist wärmegeführt betrieben. Dabei versucht das BHKW, den Wärmebedarf eines Gebäudes so weit wie möglich abzudecken und den dabei generierten Strom je nach Situation

ins Netz einzuspeisen oder dem Gebäude zur Verfügung zu stellen, wenn dort eine Nachfrage besteht. Der Eigenverbrauch ist dabei jedoch die deutlich wirtschaftlichere Variante. Dieser Punkt soll bei einem stromoptimiert betriebenen BHKW beachtet werden. Der primäre Fokus liegt zwar immer noch auf der Deckung des Wärmebedarfs, allerdings wird nun die Flexibilität des Pufferspeichers genutzt, um das BHKW nach Möglichkeit immer dann zu betreiben, wenn ein erhöhter Strombedarf vorliegt.

In einem im Rahmen von BWplus beförderten Vorprojekt (Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement, 2016 [8]) wurde am Reutlinger Energiezentrum (REZ) der Hochschule Reutlingen ein Modell entwickelt, mit dessen Hilfe die stromoptimierte Betriebsweise von BHKW simuliert werden kann. Inhalt des Projektes GalvanoFlex\_BW ist es nun, dieses Modell weiterzuentwickeln und an die Gegebenheiten von Industriebetrieben anzupassen. Die Funktionsweise des Modells soll an dieser Stelle nur kurz erläutert werden. Genauere Details sind dem Abschlussbericht zu oben genanntem Projekt sowie einer daraus entstandenen Veröffentlichung zu entnehmen [9].

Eingangsgroße für die Fahrplanoptimierung des BHKWs ist eine Prognose des kumulierten Wärmebedarfs 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 das BHKW 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. Dieses Verfahren hat gegenüber Gradientenverfahren den Vorteil, dass die Vielzahl der Rand- und Nebenbedingungen in einfacher Weise integriert werden kann. Außerdem sind nicht-lineare Zusammenhänge darstellbar, was bei den ebenfalls verwendeten MILP-Verfahren nur mit erheblichem Zusatzaufwand möglich ist. Im Vorprojekt konnte zudem gezeigt werden, dass die Genauigkeit des erreichten Optimums bei Anwendung des Monte-Carlo-Verfahrens mit ausreichender Anzahl erzeugter Fahrpläne nur wenig hinter den anderen Verfahren zurückbleibt. Auch rechnet das Monte-Carlo-Verfahren erheblich schneller, was ein weiterer Vorteil ist, da der Algorithmus so auf der BHKW-Steuerung ablaufen kann.

Als Randbedingungen im Hinblick auf die zuvor genannten Belange des BHKWs werden die Mindestlaufzeiten und Mindeststillstandzeiten für das BHKW definiert, die eingehalten werden müssen, und auch das Anlauf- und Abfahrverhalten des BHKWs wird eingerechnet. Ebenso muss der Fahrplan in jedem Fall im Bereich zwischen den beiden Wärmebedarfskurven verlaufen. Anschließend werden alle mit dem Monte-Carlo-Verfahren generierten Fahrpläne auf die erzielte Eigenstromdeckung auf Basis des Stromlastgangs ausgewertet. Aus einer Untermenge der besten Fahrpläne 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 und dient der Verifizierung und Optimierung der Steuerungsalgorithmik. Im Anschluss daran, also nach erfolgreichem Abschluss dieser Arbeiten, kann der Algorithmus auf die BHKW-Steuerung portiert und in der Praxis getestet werden. Letztendlich ist das Ergebnis aber von der Prognose der Strom- und Wärmelastgänge im Versorgungsobjekt abhängig. Je besser diese Prognosen sind, desto genauer sind die erstellten Fahrpläne und desto eher lässt sich damit die Eigenverbrauchsrate erhöhen.

#### 4 Galvanikbranche als mögliches Einsatzfeld

Für die Etablierung von KWK-Anlagen in Unternehmen und im Privatsektor ist es wichtig, dass ein gewisser Wärmebedarf innerhalb des Bilanzrahmens vorliegt oder die entstehende Wärme in ein Fern- oder Nahwärmenetz abgeführt werden kann. Der Einsatz von KWK-Anlagen bietet sich vor allem an, wenn nicht nur die erzeugte Wärme, sondern auch der parallel erzeugte Strom genutzt werden kann. Die folgende volkswirtschaftliche Betrachtung bezieht sich auf ein Szenario mit Wärmesenke innerhalb des Unternehmens.

Mittelgroße Galvanikbetriebe mit 70 bis 100 Mitarbeitern haben einen typischen Strom- und Wärmeverbrauch zwischen 5.000–10.000 MWh. Dabei verteilt sich der Energieverbrauch von Galvanikbetrieben im Durchschnitt auf 60% Strom und 40 % Wärme. Der Anteil der Energiekosten kann zwischen 7 % und 20 % variieren. Der Anteil hängt besonders vom eingesetzten Verfahren ab. [10] Details hierzu werden im Kapitel 4.1 näher beschrieben.

BHKW erreichen eine Vorlauftemperatur von bis zu 95°C und bieten sich daher für Galvanikbetriebe an. Die meisten galvanischen Prozesse werden zwischen 0°C (Harteloxal) und 90 °C (chemisch Nickel) betrieben.

Neben dem Temperaturniveau ist ein weiterer wichtiger Faktor bei der Auswahl der KWK-Anlage das

benötigte Verbrauchsverhältnis von Wärme und Strom. Zur Beschreibung der Eignung eines BHKW wird die Stromkennzahl  $S$  berechnet (siehe Formel (1) [11]).

$$S = P_{el} / \dot{Q}_{Nutz} \quad (1)$$

Hierfür wird die elektrische Nutzleistung  $P_{el}$  und die thermische Nutzleistung  $\dot{Q}_{Nutz}$  ins Verhältnis gesetzt. BHKW können je nach eingesetztem Antriebsmotor und Energiequelle eine Stromkennzahl zwischen 0,3 und 1,1 vorweisen [12]. Die durchschnittliche Verteilung von 60 % Strom und 40 % Wärme entspricht einer Stromkennzahl von 1,5. Da die Stromkennzahl von Galvanikbetrieben größer ist als die eines BHKW, kann der Strombedarf nicht vollumfänglich abgedeckt werden, sodass zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Diese Flexibilität wird im Rahmen des Forschungsvorhabens genutzt, um das Netz durch Abschalten des BHKWs in den Zeiten zu belasten, in denen zu viel regenerativer Strom im Netz vorhanden ist und um das Netz durch das Einschalten des BHKW in jenen Zeiten zu stabilisieren, in denen eine hohe Residuallast vorliegt.

Die Galvanikbranche in Deutschland besteht in etwa aus 1500 industriellen Lohn- und Betriebsgalvaniken [13]. Mit den oben genannten Zahlen berechnet sich der Energieverbrauch dieser Branche auf circa 11,25 TWh (6,75 TWh<sub>el</sub> und 4,5 TWh<sub>th</sub>). Die Effekte des BHKW-Einsatzes für Galvanikbetriebe in Deutschland können der folgenden **Tabelle** entnommen werden.

**Tabelle 1: Einsparungen eines BHKW ggü. konventioneller Erzeugung**

	Netz + Gaskessel	BHKW	Differenz
Elektr. Endenergieverbrauch (Netzbezug) [TWh <sub>el</sub> ]	6,75	1,80	4,95
Elektr. Eigenerzeugung (BHKW) [TWh <sub>el</sub> ]	-	4,95	-4,95
Therm. Endenergieverbrauch [TWh <sub>th</sub> ]	4,50	4,50	0,0
<b>Summe [TWh<sub>el+th</sub>]</b>	<b>11,25</b>	<b>11,25</b>	<b>0,0</b>
Primärenergieeinsatz zur Stromproduktion (Netz) [TWh]	15,84	4,23	11,61
Primärenergieeinsatz zur Wärmeproduktion (Kessel) [TWh]	5,00	0,0	5,00
Primärenergieeinsatz gekoppelt (BHKW) [TWh]	-	4,74	-4,74
<b>Summe Primärenergie [TWh]</b>	<b>20,84</b>	<b>8,97</b>	<b>11,87</b>
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen [t CO<sub>2</sub>]</b>	<b>9.358</b>	<b>3.438</b>	<b>5.920</b>
Wirkungsgrad: Stromnetz [%]: 42,6 [14]; Gaskessel: 90,0 [15]; BHKW: 95,0 [11]			
Spezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen [g CO <sub>2</sub> /kWh]: Stromnetz: 527 [16]; Gaskessel: 202 [15]; BHKW: 255 [15]			

Bei einem rein wärmegeführten Betrieb und einer Stromkennzahl von 1,1 könnten 4,95 TWh<sub>el</sub> durch BHKW in Unternehmen erzeugt werden, während die restlichen 1,8 TWh<sub>el</sub> aus dem Netz bezogen werden müssten. Die hier angenommenen spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen für das BHKW stellen einen Mittelwert aus unterschiedlichen BHKW mit unterschiedlicher Stromkennzahl und Energieträgern dar. Diese gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung würde gegenüber einer getrennten Erzeugung zu einer CO<sub>2</sub>- und Primärenergieeinsparung von circa 5.920 t CO<sub>2</sub> und 11,87 TWh führen [11, 14–16]. Auf Deutschland bezogen, das pro Jahr etwa 3.756 TWh Energie verbraucht [17], könnten auf diese Weise circa 0,3 % des Primärenergieverbrauchs eingespart werden.

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen stellt eine Momentaufnahme dar. Steigt der Anteil der erneuerbaren Energien aus PV (Photovoltaik) und Windkraftanlagen, ändert sich entsprechend das Verhältnis zu Gunsten des Stromnetzes. In der langfristigen Betrachtung spielt die KWK-Technologie jedoch eine wichtige Rolle, da, ohne „grünen“ (Kohlen-)Wasserstoff oder Power-to-Gas die Energiewende kaum umzusetzen sein wird [18].

#### 4.1 Einordnung der galvanischen Verfahren

Die hohen Energiekostenanteile der Branche gehen auf das Grundprinzip der Galvanotechnik zurück. Die Schichtabscheidung erfolgt elektrochemisch aus meist wässrigen Metallsalzlösungen, sogenannten Elektrolyten. Durch das Anlegen eines elektrischen Gleichstroms werden Metallionen aus den Elektrolyten am Bauteil zu einer schützenden Schicht reduziert. Zur elektrischen Energie kommt der Energiebedarf für die Temperierung der Prozesse. Die meisten Verfahren, wie das Vernickeln oder das Verzinken, arbeiten bei Temperaturen zwischen 20 und 60 °C [19].

Dem Beschichtungsprozess sind Vorbehandlungsschritte zur Reinigung der Bauteile vorgeschaltet, die meist bei Temperaturen zwischen 40 und 60 °C betrieben werden und den Wärmebedarf mitbestimmen [19]. Je nach Verfahren können thermische Nachbehandlungsprozesse notwendig sein. Der

Energieverbrauch erweitert sich durch verschiedene Komponenten galvanotechnischer Anlagen, wie Umwälzpumpen, Absaugung, Trockner und Antriebe.

Eine Studie des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz ermittelte für einen ausgewählten Betrieb folgende Hauptverbraucher: Gleichrichter 32 %, Beheizung der Prozesse 23 % (inkl. Vor- und Nachbehandlung), Raumbeheizung 28% und elektrische Antriebe 12% [10]. Daraus ergibt sich eine ungefähre Aufteilung von 60 % elektrischem und 40 % thermischem Energieverbrauch, die sehr günstig für den Betrieb von KWK ist. Die genauen Anteile sind jedoch stark von den jeweiligen Beschichtungsverfahren abhängig. Im Folgenden wird ein Überblick über die Energieintensität verschiedener galvanischer Prozesse gegeben.

Einen besonders hohen Energiebedarf besitzen die Hartverchromung und das Harteloxieren. Der elektrische Energiebedarf ergibt sich maßgeblich aus dem Produkt aus Strom und Spannung. Bei der Hartverchromung wird mit hohen Stromdichten zwischen 20 und 100 A/dm<sup>2</sup> und den sich daraus ergebenden Spannungen von etwa 8–5 V gearbeitet [20]. Ein erheblicher Teil der elektrischen Energie wird während der Abscheidung in Wärme umgesetzt, die durch Kühlung abgeführt werden muss. Zuvor wird der Elektrolyt auf 50–60 °C aufgeheizt und muss, sofern nicht beschichtet wird, auf diesem Temperaturniveau gehalten werden.

Beim Harteloxieren werden sehr hohe Spannungen bis zu 100 V, bei Stromdichten üblicherweise zwischen 2 und 5 A/dm<sup>2</sup> benötigt. Der Elektrolyt muss auf rund 0 °C gekühlt werden, um die typischen Eigenschaften von Harteloxalschichten gewährleisten zu können [19]. Wie bei der Hartverchromung muss der Prozess stark gekühlt werden, da bis zu 70 % der über die Gleichrichter eingetragenen Energie als Joulesche Wärme wieder abgeführt werden muss [21].

Einen sehr hohen thermischen Energieverbrauch besitzt zudem die chemische Vernicklung, ein autokatalytischer Prozess, der für eine wirtschaftliche Abscheidungsgeschwindigkeit bei Temperaturen um 90 °C betrieben werden muss [19]. Für diese drei Verfahren erscheint der Einsatz der KWK sehr lohnenswert, da sich durch den Umstieg auf eine gekoppelte Erzeugung besonders große Einsparungen im Vergleich zum netzseitigen Energiebezug ergeben.

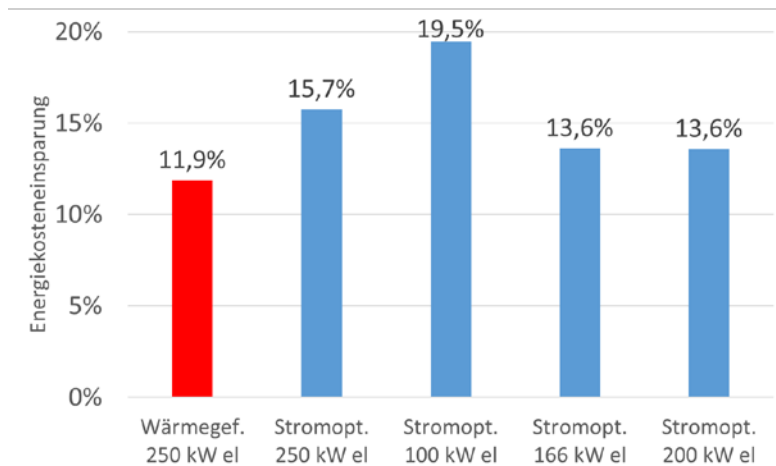
Weitere galvanotechnische Verfahren wie Verzinken, Verkupfern oder Vernickeln, bei denen moderate Temperaturen und vergleichsweise niedrige Stromdichten vorliegen [19], haben einen geringeren flächenbezogenen Energieverbrauch. Der Betrieb von KWK-Anlagen kann trotzdem sinnvoll sein, da das Verhältnis aus Strom- und Wärmebedarf auch hier sehr günstig ist.

Der Strombedarf unterliegt größeren Schwankungen als der Wärmebedarf. Deshalb ist es besonders lohnenswert, eine stromoptimierte, flexible und damit residuallastangepasste KWK zu entwickeln.

#### 4.2 Stromoptimierte BHKW in der Galvanik

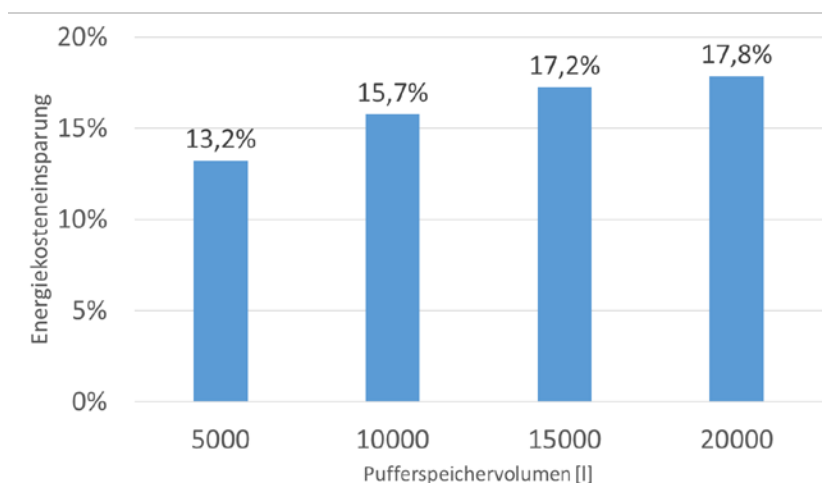
Um einen Einblick in die Vorteile des stromoptimierten BHKW-Betriebs in der Galvanik zu bekommen, sollen an dieser Stelle erste Ergebnisse vorgestellt werden. Untersucht wurde ein Galvanikbetrieb, bei welchem der Jahreswärmebedarf den Jahresstrombedarf um circa das 3-fache übersteigt. Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Energiekosteneinsparungen beziehen sich auf die Option Strom und Wärme getrennt zu erzeugen. Das heißt, Strom wird aus dem Netz bezogen und Wärme im Gaskessel erzeugt, wobei durchschnittliche Industriepreise für Strom und Gas in Höhe von 17,2 ct/kWh<sub>el</sub> (nach BDEW, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) und 4,5 ct/kWh (Hs) (aus: statista) angesetzt sind. Für das BHKW sind Stromerlöse nach KWKG (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz), Gaskosten sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung hinterlegt, Kapitalkosten sind dagegen nicht enthalten.

Einen Überblick der Ergebnisse zeigt **Abbildung 1**. Die linke Säule (rot) zeigt die wärmegeführte Betriebsweise eines BHKW mit 250 kW<sub>el</sub>. Es ist zu erkennen, dass durch den Einsatz des BHKWs bereits bei einer wärmegeführten Betriebsweise circa 11,9% der Energiekosten eingespart werden. Betreibt man das BHKW hingegen stromoptimiert, ergibt sich eine erhöhte Kosteneinsparung von 15,7%. Das heißt, der Kostenvorteil des BHKWs wird um etwa ein Drittel erhöht. Bei anderen BHKW-Größen ergeben sich teilweise noch höhere Einsparungen. Beim BHKW mit 100 kW<sub>el</sub> (3. Säule von links) ist zu beachten, dass man für BHKW bis einschließlich 100 kW<sub>el</sub> noch einen KWK-Zuschlag für selbst genutzten Strom erhält. Somit hat das 100 kW<sub>el</sub> BHKW einen zusätzlichen Vorteil gegenüber den größeren Varianten.



**Abbildung 1: Vergleich verschiedener stromoptimierter BHKW mit der klassischen wärmegeführten Betriebsweise**

**Abbildung 2** zeigt die Verhältnisse für das BHKW mit 250 kW<sub>el</sub> in Verbindung mit Pufferspeichern mit Volumina von 5.000, 10.000, 15.000 und 20.000 Litern. Es ist deutlich erkennbar, dass bei Zunahme des Puffervolumens die errechneten Einsparungen ansteigen. Je größer allerdings der Speicher ist, desto kleiner fällt dieser Vorteil aus. Ziel im weiteren Projektverlauf ist daher, die PufferspeichergroÙe und die damit verbundenen Investitionskosten abzuwägen und dadurch die optimale GröÙe zu finden.



**Abbildung 2: Pufferspeichervariationen für ein 250 kW<sub>el</sub> BHKW**

Die Ergebnisse belegen, dass der Einsatz eines BHKWs in der Galvanik nicht nur generell lohnenswert ist, sondern dass die stromoptimierte Betriebsweise diesen Effekt gegenüber der klassischen wärmegeführten Betriebsweise merklich verstärkt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Aufsatz wurde gezeigt, wieso eine Interaktion mit dem flexiblen Energiemarkt notwendig und insbesondere für die Zukunft relevant ist. Zudem wurde dargelegt, welche Einflüsse die Integration von BHKW in die Galvanikindustrie hat und welche Vorteile dadurch nicht nur für das einzelne Unternehmen, sondern für die gesamte Industrie erzielt werden können. Die stromoptimierte Fahrweise von BHKW ermöglicht bereits jetzt Einsparungen für die einzelnen Unternehmen.

Im weiteren Projektverlauf wird die Energieflexibilität von BHKW detailliert analysiert und eine optimale Fahrweise entwickelt, die nicht nur preisinduziert, sondern auch residuallast-angepasst arbeiten kann.

## Literatur

- [1] Agora Energiewende (2018): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2018. Online verfügbar unter: [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung\\_2017/Agora\\_Jahresauswertung-2017.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Agora_Jahresauswertung-2017.pdf)
- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2017): Monitoringbericht 2017. Online verfügbar unter: [https://www.hannover.ihk.de/fileadmin/data/Dokumente/Themen/Energie/Monitoringbericht\\_2017.pdf](https://www.hannover.ihk.de/fileadmin/data/Dokumente/Themen/Energie/Monitoringbericht_2017.pdf)
- [3] Metz M. Flexible Energieversorgung. Modellierung der Last- und Erzeugungssituation dezentraler Versorgungsgebiete zur Bestimmung der Systemflexibilität. 2013 Dissertation Technische Universität Dortmund, 2013
- [4] Köse, E. Sauer, A. Pelzel, C. (2017): Energieflexibel durch bivalente Produktionsanlagen in wt Werkstatttechnik online, 2017; 107:366-372
- [5] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V.; bofest consult GmbH (2014): Kurzstudie - Beitrag von zentralen und dezentralen KWK-Anlagen zur Netzunterstützung. Online verfügbar unter: [https://www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/infos/studien/bc\\_BKWK\\_Beitrag\\_von\\_zentralen\\_und\\_dezentralen\\_KWK-Anlagen\\_zur\\_Netzstuetzung\\_FINAL.pdf](https://www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/infos/studien/bc_BKWK_Beitrag_von_zentralen_und_dezentralen_KWK-Anlagen_zur_Netzstuetzung_FINAL.pdf)
- [6] Forschungsverbund Erneuerbare Energien (2013): Regelleistung aus Blockheizkraftwerken - Treiber, Potenziale und Hemmnisse. Online verfügbar unter: [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2013-2/th2013\\_06\\_03.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2013-2/th2013_06_03.pdf)
- [7] VDI-Berichte 2212, Optimierung in der Energiewirtschaft (2013): Einsatz von BHKW mit Wärmespeicher im virtuellen Regelenergiekraftwerk - Modellierung der Regelenergiebereitstellung bei komplexen Energiesystemen mit intertemporalen Restriktionen. Online verfügbar unter: [https://www.energietechnik.tu-berlin.de/fileadmin/fg106/Dateien/Mitarbeiter/2013\\_Spieker\\_-\\_BHKW\\_im\\_virtuellen\\_Regelenergiekraftwerk\\_VDI-Berichte\\_2212\\_.pdf](https://www.energietechnik.tu-berlin.de/fileadmin/fg106/Dateien/Mitarbeiter/2013_Spieker_-_BHKW_im_virtuellen_Regelenergiekraftwerk_VDI-Berichte_2212_.pdf)
- [8] Lödige, D., Thomas, B., Widmann, C. (2016): „Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement“, Abschlussbericht
- [9] 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
- [10] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): „Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie“, Augsburg 2003
- [11] Zahoransky, Richard A. (2009): Energietechnik - Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf. 4. aktualisierte und erweiterte Auflage. ISBN 978-3-8348-0488-4
- [12] BINE Informationsdienst (2006): Kraft und Wärme koppeln. Online verfügbar unter: [http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis\\_Energie/Basis\\_Energie\\_Nr.\\_21/basis21internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._21/basis21internetx.pdf)
- [13] Institut für Ökologie und Politik GmbH (o.J.): Branchenanalyse der deutschen Galvano- und Oberflächentechnik. Online verfügbar unter: <http://www.reach-helpdesk.info/fileadmin/reach/dokumente/Anhang01Branchenanalyse.pdf>
- [14] Umweltbundesamt (2018): Konventionelle Kraftwerke und erneuerbare Energien. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-5>
- [15] Öko-Institut e.V. (2015): Aktueller Stand der KWK-Erzeugung (Dezember 2015). Online verfügbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/2450/2015-607-de.pdf>
- [16] Umweltbundesamt (2018): Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern mit politischen Zielen; online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#textpart-2>
- [17] Umweltbundesamt (2018): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>
- [18] BMWi (2018): Strommarkt der Zukunft: Kraft-Wärme-Kopplung. Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/moderne-kraftwerkstechnologien.html>
- [19] 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).
- [20] 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).

- [21] Kölle, Stefan; Schmid, Klaus; Metzner, Martin; Mock, Christian (2016): Das ÖKOXAL-Verfahren: Verbesserte Energieausbeute beim Hartanodisieren. In: Alexander Michaelis (Hg.): Symposium: Anodisieren - Oxidschichten von hart bis smart. Dresden, 24.-25. November 2016. Fraunhofer IKTS. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.