

**ebök Institut GmbH**

**Entwicklung einer Methodik zur Einbindung von KMU  
unterschiedlicher Branchen in ein Virtuelles Kraftwerk**

**Projektkürzel: VK\_Koop**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 33154/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr. Claus Kahlert, ebök Institut GmbH  
Dipl.-Ing. Uwe Ziegler, AVAT Automation GmbH  
Thomas Röger M.Sc., PATAVO GmbH  
Prof. Dr. Sabine Löbbe, Hochschule Reutlingen  
Prof. Dr. Helmut Nebeling, Hochschule Reutlingen

Februar 2020



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>33154/01</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>360.490 EUR</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung einer Methodik zur Einbindung von KMUs unterschiedlicher Branchen in ein Virtuelles Kraftwerk</b>				
<b>Stichworte</b>	Energie				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>33 Monate</b>	<b>01.03.2017</b>	<b>30.11.2019</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte					
<b>Bewilligungsempfänger</b>	ebök Institut GmbH			Tel	07071/9597-19
	Stäudach 99			Fax	07071/9597-21
	72074 Tübingen			Projektleitung	
				Prof. Dr. Claus Kahlert	
<b>Kooperationspartner</b>	AVAT Automation GmbH			Bearbeiter	
	Hochschule Reutlingen			Prof. Dr. Claus Kahlert	
PATAVO GmbH					
Stadtwerke Balingen					

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Das Ziel des Projekts besteht darin, die Grundlagen für die gemeinsame Teilnahme von KMU am Strommarkt zu untersuchen und daraus einen Leitfaden zu entwickeln. Der Ansatz folgt dem Modell einer industriellen Symbiose, wobei die Partner ihre Flexibilitäten bei der Abnahme und Erzeugung von Elektrizität untereinander austauschen oder, via Aggregator, koordiniert am Strommarkt handeln und damit ein Virtuelles Kraftwerk (VK) realisieren. Bei dem gewählten Multiagenten-Ansatz behält jeder Partner des VK die vollständige Kontrolle über seine Prozesse und Daten.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Das Projekt umfasst sechs inhaltliche Arbeitspakete (APs) sowie „Berichte und Verbreitung“, AP7 und „Projektmanagement“, AP8. Das Projektkonsortium untersucht fünf Musterbetriebe unterschiedlicher Branchen und Größen; daraus resultierten die ersten Einträge in eine später erweiterbare Technologie-Matrix, welche branchen-übergreifende (Querschnittstechnologien) und -spezifische Kennwerte zusammenfasst.

AP1 untersucht mittels Befragungen die Motivation von Betrieben zur Teilnahme an einem VK sowie die notwendigen Informationen, welche Unternehmen für eine Entscheidungsfindung benötigen.

AP2 entwickelt die Kriterien, nach denen sich Flexibilitäten bei Abnahme und Erzeugung von Elektrizität identifizieren lassen. Als Quellen werden Energiemanagement-Daten, direkte Messungen und Prozesssimulationen einander gegenüber gestellt.

AP3 vergleicht die Aussagekraft von Messungen, welche sich in der zeitlichen Auflösung und der Anzahl der Datenpunkte unterscheiden. Die zweite Aufgabe dieses AP ist die Spezifikation einer Schnittstelle zwischen Messung und Prozesssteuerung und ggf. ein Probetrieb.

AP4 untersucht die Frage, wie aus einer „technischen“ eine „vermarktbar Flexibilität“ werden kann. Es entwickelt Geschäftsmodelle für das „Koppelprodukt Flexibilität“.

AP5 befasst sich mit der technischen Sicht des Aggregators auf die Partner-Unternehmen eines VK. Es spezifiziert eine Kommunikations-Plattform, auf der die Partner unter seiner Moderation handeln können.

AP6 entwickelt Geschäftsmodelle für den Aggregator am Beispiel eines kleinen Stadtwerks.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Virtuelle Kraftwerke sind Zusammenschlüsse von Strom-Erzeugern und –Verbrauchern, die durch koordiniertes Handeln Netzdienstleistungen anbieten können. Der einzelne Akteur nutzt dabei seine Flexibilität.

Der Einstieg in die Flexibilitätsvermarktung stellt für KMU noch einen schwierigen Schritt dar, da auch der Smart Meter keinen niedrighschwelligigen Eintritt erlauben wird. Neben dem Know-how zu den eigenen Prozessen wird bei der Einführung in der Regel externe Expertise benötigt. Ein „natürlicher“ Zugang ergibt sich aus den Synergien mit Effizienzberatung und Energiemanagement-Systemen. Für die Musterbetriebe waren diese Beratungen kostenlos und mit überschaubarem Aufwand verbunden.

Die detaillierten Untersuchungen dort zeigten, dass eine Verknüpfung von Daten des Energieaudits bzw. Management-Systems mit Interviews die wichtigen Flexibilitäten herausarbeitet. Konkret wurden in den 5 untersuchten Betrieben 68 Anlagen und Prozesse betrachtet, von denen 43 als technisch geeignet eingeordnet wurden. Zur Verifikation der Auswahl fand in allen Betrieben eine ausgedehnte Begehung statt und der Lastgang ausgewählter Anlagen wurde in Messkampagnen von Stunden bis Wochen dokumentiert und analysiert. Daraus resultierte eine Empfehlung für den Vermarktungspfad. Parallel erarbeitete der Partner HSRT exemplarische Modelle, die Flexibilitäten auch in anderen Technologien darstellen können.

Untersuchungen von Strommärkten und deren Akteure zeigten, dass für eine Vertiefung innerhalb des Projekts die Spotmärkte (Day-Ahead und Intraday) am erfolversprechendsten erscheinen. Bei der Bestimmung des „wirtschaftlichen“ und „praktisch, organisatorischen“ Potentials aus dem technischen, musste eine Reihe von Kandidaten-Prozessen gestrichen werden, da sie entweder zu klein oder nicht in eine digitale Produktionsplanung eingebunden bzw. nicht vernetzt waren. Solche Klassifizierungen können in anderen Betrieben natürlich anders ausfallen, wenn sich Anlagengröße und Investitionsstruktur anders darstellen; deshalb wurde bei der Datenerhebung für jeden Anlagentyp auch dessen Skalenverhalten betrachtet.

In einem Betrieb konnte die in einem Parallel-Projekt entwickelte Hard- und Software installiert werden. Diese führt mittels eines Produktionsketten-Modells eine Gesamtkostenoptimierung aus und erstellt damit Fahrpläne für jeden Produktionsschritt. Der Optimierer kann damit nicht nur den Strompreis, sondern beliebige andere Preissignale verarbeiten. Das Unternehmen arbeitet auch nach Projektende weiter mit dem System. Bei drei weiteren Betrieben scheiterte die Installation leider an inkompatiblen Schnittstellen, was im Rahmen des Projekts nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu beheben wäre.

Die Fahrpläne und damit verbundenen Lastgänge stellen die Schnittstelle zum Stromhandel dar. An dieser Stelle wird vollständig von den Prozessen in den Betrieben abstrahiert, Daten und Know-how bleiben dort. Der angemeldete Lastgang wird von einer Kommunikationsplattform verarbeitet, die beliebig viele Klienten bedienen kann. Diese Software optimiert das Ensemble der Lastgänge und bereitet sie für den Stromhandel vor. Betreiber der Plattform ist ein Aggregator, der gegenüber dem Netz als Virtuelles Kraftwerk agiert. Diese Rolle war ursprünglich einem kleinen, regionalen Stadtwerk zugeordnet. Die Untersuchung der möglichen Geschäftsmodelle zeigte früh, dass kleine Stadtwerke mit der Rolle überfordert sind. Ein Ausweg besteht darin, bestimmte Dienstleistungen an Partner auszulagern. Hierfür wurden drei Geschäftsmodelle entwickelt.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Projektergebnisse wurden auf 23 Tagungen und Veranstaltungen der Öffentlichkeit vorgetragen, dabei waren potentielle Multiplikatoren und Interessenten die primäre Zielgruppe. Darüber hinaus wurde die Idee des kooperativen Lastmanagements in zahlreichen Diskussionen auf Tagungen und in Fachkreisen verbreitet. Ein Beitrag zu einem Sammelband befindet sich in Vorbereitung.

## **Fazit**

Das Projekt hat alle gesteckten Ziele erreicht. Nach der Anpassung der Arbeitspakete 4 bis 6 im Mai 2018 und Juni 2019 konnten Synergien zu parallel laufenden Projekten im Kontext des Virtuellen Kraftwerks Neckar-Alb genutzt werden. Dadurch gelang es, deutlich anspruchsvollere Aufgaben zu erledigen, als ursprünglich formuliert waren.

Die entwickelten Technologien lassen sich bei KMU heute nur in Ausnahmefällen profitabel einsetzen. In den kommenden Jahren wird durch den Smart-Meter-Rollout jedoch eine neue Situation entstehen, die auch bei kleinen Betrieben ein Flexibilitäts-Management erfordert.

Der ursprüngliche Ansatz, einem kleinen Stadtwerk die Rolle des Aggregators zuzuweisen, ist dennoch zukunftsfähig. Auch wenn es heute finanziell damit überfordert ist, so kann es mit der Hilfe externer Dienstleister doch seine Kernkompetenz, die Kundennähe, ausspielen. Damit ergibt sich auch die Chance, Betriebe, die zu einem anderen Versorger abgewandert sind, wieder für sich zu gewinnen.

## Inhalt

Inhalt .....	5
Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis .....	12
Abkürzungsverzeichnis.....	13
Zusammenfassung .....	15
1. Einleitung .....	17
1.1 Netzsituation.....	17
1.2 Glättung durch Flexibilität .....	17
1.3 Virtuelle Kraftwerke .....	18
2. Arbeitspaket 1: Teilnehmerauswahl und -ansprache .....	21
2.1 Anforderungsprofil.....	21
2.2 Instrumente .....	21
2.2.1 Markteinschätzung und Motivation .....	21
2.2.2 Fragebogen .....	22
2.2.3 Technologiematrix .....	22
2.2.4 Synergien mit Energieeffizienz .....	22
2.3 Fazit .....	22
3. Arbeitspaket 2 & 3: Erfassungsmethode und Detailuntersuchung .....	23
3.1 Aufgabenstellung der Arbeitspakete .....	23
3.1.1 Arbeitspaket 2 .....	23
3.1.2 Arbeitspaket 3 .....	23
3.1.3 Ergebnisverarbeitung der Arbeitspakete 2 & 3 .....	23
3.2 Methodenbeschreibung der Flexibilitätsauswahl .....	23
3.2.1 Extraktion der Daten aus ISO 50001 / DIN EN 16247.....	24
3.2.2 Erhebung der Daten aus einem Lastmanagementsystem.....	24

3.2.3	Begehung und Datenerhebung .....	25
3.3	Holcim (Süddeutschland) GmbH .....	25
3.3.1	Kurzbeschreibung .....	25
3.3.2	Untersuchte Anlagen .....	25
3.3.3	Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse.....	25
3.4	Mayer & Cie GmbH & Co. KG .....	26
3.4.1	Untersuchte Anlagen .....	26
3.4.2	Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse.....	27
3.5	Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanztechnik KG .....	28
3.5.1	Kurzbeschreibung .....	28
3.5.2	Untersuchte Anlagen .....	28
3.5.3	Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse.....	29
3.6	Franz Tress GmbH & Co. KG .....	30
3.6.1	Kurzbeschreibung .....	30
3.6.2	Untersuchte Anlagen .....	30
3.6.3	Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse.....	31
3.7	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen (ZA).....	33
3.7.1	Kurzbeschreibung .....	33
3.7.2	Untersuchte Anlagen .....	33
3.7.3	Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse.....	35
3.8	Flexibilität bei Produktionsanlagen der Metallbe- und -verarbeitung .....	38
3.9	Fazit der Arbeitspakete 2 & 3 .....	39
4.	Arbeitspaket 4: Geschäftsmodelle für Flexibilität in den Unternehmen .....	40
4.1	Strommarkt .....	40
4.1.1	Regelleistung .....	40
4.1.2	Spotmarkt .....	41
4.1.3	Intraday-Markt .....	42
4.1.4	Intraday-Auktionsmarkt .....	42
4.1.5	Kontinuierlicher Intraday-Markt.....	42
4.2	Vergleich der Pool-Manager .....	42
4.3	Leitfaden für die Auswahl des geeigneten Strommarkts.....	43

4.4	Geschäftsmodelle für Flexibilität in produzierenden Unternehmen.....	45
4.5	Workshops mit Musterbetrieben .....	46
4.5.1	Holcim (Süddeutschland) GmbH .....	46
4.5.2	Mayer & Cie. GmbH & Co. KG.....	47
4.5.3	Kocher + Beck GmbH & Co. KG .....	48
4.5.4	Franz Tress GmbH & Co. KG.....	48
4.5.5	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen.....	48
4.5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	49
5.	Arbeitspaket 5: Design einer Kommunikationsplattform .....	50
5.1	Anforderungen von Industrieunternehmen und Stromwirtschaft.....	50
5.2	Architektur des Virtuellen Kraftwerks .....	51
5.2.1	Vermarktung am Spotmarkt – Prinzip .....	51
5.2.2	Aufbau und gewähltes Verfahren.....	53
5.3	Der Prozessablauf und die Modellierung am Beispiel eines Zementwerks.....	54
5.3.1	Anlagenkonfiguration .....	54
5.3.2	Gesamtplanung .....	55
5.3.3	Optimierung .....	56
5.3.4	Akzeptierung des optimierten Fahrplans .....	57
5.4	Aggregationsebene .....	57
5.5	Erfahrungen mit der Kommunikationsplattform .....	58
6.	Arbeitspaket 6: Geschäftsmodelle für Stadtwerke.....	59
6.1	Analyse der Wertschöpfung als Basis für die Geschäftsmodellentwicklung...	59
6.2	Identifikation der Herausforderungen bei der Integration eines VK sowie der Auswirkungen auf die Unternehmensentwicklung.....	61
6.3	Entwicklung von Geschäftsmodellen als Optionen für Stadtwerke als Betreiber eines VK .....	64
6.4	Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur schematischen Beurteilung der Geschäftsmodelle .....	66
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	67
7.	Fazit.....	69

8. Kommunikation und Verbreitung .....	70
8.1 Interner Austausch.....	70
8.2 Öffentliche Präsentationen.....	70
Literaturverzeichnis.....	73
Anhang 1: Umfrage zur Stromnutzung .....	A1-1
Anhang 2: Technologiematrix .....	A2-1
Technologiematrix als Beratungs- und Erhebungs-Instrument .....	A2-2
Anhang 3: Flexibilitätsmodellierung .....	A3-1
1. Analyse von Produktionsanlagen der Metallbe- und -verarbeitung .....	A3-2
1.1 Kurzbeschreibung .....	A3-2
1.2 Einführung metallische Produktionsprozesse.....	A3-2
1.3 Detektion netzdienlicher Flexibilität.....	A3-3
1.4 Produktionsketten metallischer Bauteile .....	A3-3
1.5 Energetische Grundlagen Metallschmelzen .....	A3-4
1.6 Energetische Analyse Additive Fertigung .....	A3-4
2. Grundsätze energetischer Analysen von Bearbeitungsprozessen.....	A3-5
2.1 Energetische Analyse Drehzentrum.....	A3-5
2.2 Energetische Analyse Bearbeitungszentrum .....	A3-7
2.3 Energetische Analyse von Maschinenantrieben.....	A3-8
2.4 Energetische Analyse unterschiedlicher Werkstücke .....	A3-9
Anhang 4: Leitfaden Prüfung und Eignung von Flexibilität.....	A4-1
Anhang 5: Produktdatenblatt SE <sup>2</sup> OPTIMIZER .....	A5-1
Anhang 6: Interviewleitfäden .....	A6-1
1. Leitfaden Dienstleister .....	A6-2



2. Leitfaden Stadtwerke .....A6-3

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Härteofen 29 kW, Quelle: Aufnahme PATAVO .....	29
Abbildung 2: Härteofen 5,8 kW, Quelle: Aufnahme PATAVO .....	29
Abbildung 3: Möglicher Einfluss der Galvanik auf den Gesamtlastgang, Quelle: PATAVO.....	30
Abbildung 4: BHKW 1, Quelle: Aufnahme PATAVO .....	31
Abbildung 5: BHKW 2, Quelle: Aufnahme PATAVO .....	31
Abbildung 6: BHKW-Betrieb August 2017, Quelle: PATAVO .....	32
Abbildung 7: BHKW-Betrieb Oktober 2017, Quelle: PATAVO .....	32
Abbildung 8: Messkurve 1 (Matrizenreinigung), Quelle: PATAVO .....	33
Abbildung 9: Messkurve 2 (Matrizenreinigung), Quelle: PATAVO .....	33
Abbildung 10: Leistungsverlauf Gebläse 3 (FU-gesteuert), Quelle: PATAVO .....	34
Abbildung 11: Leistungsverlauf Entleerungspumpen (7.12.2017), Quelle: PATAVO .....	35
Abbildung 12: Leistungsverlauf Entleerungspumpen (8.12.2017), Quelle: PATAVO .....	35
Abbildung 13: An- und Abfahrverhalten der Entleerungspumpen, Quelle: PATAVO .....	36
Abbildung 14: Gebläseleistung und Sauerstoffkonzentration, Quelle: PATAVO .....	37
Abbildung 15: Anfahrverhalten BHKW 1 und BHKW 5, Quelle: PATAVO.....	37
Abbildung 16: Flussdiagramm zum netzdienlichen Einsatz von Produktions-Flexibilität [Quelle: Hochschule Reutlingen] .....	39
Abbildung 17: Erlösentwicklung Regelenergie-Leistungspreis [Sutt2018].....	40
Abbildung 18: Anzahl der präqualifizierten Pool-Manager im Regelleistungsmarkt [Sutt2018] .....	41
Abbildung 19: Spreadentwicklung Intradaypreis gegen Day-Ahead Stundenpreis [Sutt2018]...	41
Abbildung 20: Vergleich der Anbieter anhand folgender Kriterien: Innovationskraft, Marktabdeckung, Internationalität, Kompatibilität, DSM Erfahrungen, Steuerungstechnik [Sutt2018] .....	43
Abbildung 21: Grafische Ergebnisdarstellung nach 5 Kriterien [Varli2018] .....	44
Abbildung 22: Leitfaden zur Auswahl der Vermarktungsmöglichkeiten [Varli2018] .....	44
Abbildung 23: Auflistung der wesentlichen Schritte zur Prüfung der Eignung von ausgewählten Industrielasten für den Einsatz von DSM in einem Virtuellen Kraftwerk [Hötz2018] .....	46
Abbildung 24: Beispielzahlen eines Zementwerkes, Quelle: Aufnahme AVAT.....	46
Abbildung 25: Anforderungen von Industrieunternehmen und Elektrizitätswirtschaft, Quelle: AVAT .....	50
Abbildung 26: Tagesverlauf Day-Ahead-Auktion, Quelle: AVAT .....	51
Abbildung 27: Heatmap Börsenpreis Day-Ahead-Auktion Dez. 2016, Quelle: AVAT .....	52
Abbildung 28: Verschiebungspotential und Erlöse an einem Januartag, vereinfachte Darstellung, Quelle: AVAT .....	52

Abbildung 29: Architektur des Virtuellen Kraftwerks mit einem Aggregator, der mehrere Betriebe (Steuerboxen) vermarktet, Quelle: AVAT .....	53
Abbildung 30: Ablauf der Optimierung, Quelle: AVAT .....	54
Abbildung 31: Realer Prozessablauf des Zementwerks, Quelle: Holcim (Süddeutschland) GmbH.....	54
Abbildung 32: Abstraktion des Prozesses, Quelle: AVAT .....	55
Abbildung 33: Modellierung in Software, Quelle: AVAT .....	55
Abbildung 34: Vorgaben für die Laufzeiten, Quelle: AVAT .....	56
Abbildung 35: Vorgaben für die Produktionsmengen, Quelle: AVAT .....	56
Abbildung 36: Optimierungslauf, Quelle: AVAT .....	57
Abbildung 37: Optimierungsergebnis, Quelle: AVAT.....	57
Abbildung 38: Wertschöpfungsökosystem .....	60
Abbildung 39: Wertschöpfungskette [Wie2020].....	60
Abbildung 40: Prozesslandkarte [Wie2020].....	61
Abbildung 41: Geschäftsmodelle für Stadtwerke [Wie2020] .....	65
Abbildung 42: Bewertungsmethodik Nutzwert-Kostenanalyse [Wie2020] .....	66
Abbildung 43: Verbraucher eines Drehzentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen] .....	A3-6
Abbildung 44: Grundverbrauchsanalyse der Maschinenaggregate eines Drehzentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen] .....	A3-7
Abbildung 45: Grundverbrauchsanalyse der Maschinenaggregate eines Bearbeitungszentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen].....	A3-8
Abbildung 46: Leistungskennlinie unterschiedlicher Werkstücke [Quelle: Hochschule Reutlingen] .....	A3-10
Abbildung 47: Leistungsgang bei zeitlicher Flexibilität mehrerer Produktionsanlagen [Quelle: Hochschule Reutlingen].....	A3-11
Abbildung 48: Auflistung der wesentlichen Schritte zur Prüfung der Eignung von ausgewählten Industrielasten für den Einsatz von DSM in einem Virtuellen Kraftwerk .....	A4-11

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung verschiedener DSM-Studien .....	45
Tabelle 2: Erfolgs- und erschwerende Faktoren zur Implementation eines VK .....	62
Tabelle 3: Strukturelle, kulturelle und strategische Auswirkungen des VK-Betriebs .....	63
Tabelle 4: Potenziale und Herausforderungen des kooperativen Lastmanagements .....	64
Tabelle 5: Qualitative Bewertungskriterien .....	67
Tabelle 6: Kostenstruktur [Wie2020] .....	67
Tabelle 7: Liste der betrachteten Anlagen in den Musterbetrieben .....	A2-2
Tabelle 8: Liste der Flexibilitäts-Kandidaten in den Musterbetrieben .....	A2-3
Tabelle 9: Die Technologiematrix als qualitatives Werkzeug für den Erstkontakt.....	A2-4
Tabelle 10: Legende für Gewichtsstufen .....	A2-4
Tabelle 11: Kategorien für die detaillierte Datenerfassung .....	A2-5
Tabelle 12: Bearbeitungsoperationen mit Lastpotenzial .....	A3-9

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
CLS	Controllable Local Systems-(eine Schnittstelle des Smart-Meter-Gateway)
EDL-G	Energiedienstleistungsgesetz
EMAS	Eco-Management and Audit Scheme, von der EU entwickelt
GWh	Gigawattstunde, 1.000 MWh
ISO 50001	Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde, 1.000 kWh
SMGW	Smart-Meter-Gateway
TWh	Terawattstunde, 1.000 GWh
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity; Europäisches Verbundnetz
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VK	Virtuelles Kraftwerk
VKNA	Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb
ZAB	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen



## Zusammenfassung

Der wachsende Anteil volatiler, regenerativer Elektrizitätsquellen erschwert die Regelung der Stromnetze. Neben den Mechanismen auf der Versorgungsseite können auch die Abnehmer, die häufig auch Produzenten von Elektrizität sind (Prosumenten), einen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Das zentrale Instrument für ein netzdienliches Verhalten ist die Flexibilität bei Verbrauch und Erzeugung. Das Projekt VK\_Koop entwickelt für KMU eine Methode zur Nutzung und Vermarktung von Flexibilität am Strommarkt.

Flexible Prozesse wirken aus Sicht des Netzes wie Stromspeicher, die es stützen, aus Sicht der Betriebe stellen sie ein Koppelprodukt dar, das aktiv geplant werden muss. Hierfür sind die technischen, organisatorischen und logistischen Voraussetzungen zu klären und in den Routinebetrieb zu überführen. Mehrere Betriebe können sich zu einem Virtuellen Kraftwerk zusammenschließen, womit sie ihre Aktionen und die Vermarktung bündeln.

Das Projekt entwickelt Strategien zur Netzdienlichkeit für einzelne Betriebe und Zusammenschlüsse, welche die Kontrolle über Prozesse und die Datenhoheit bei den Betrieben belässt und gleichzeitig auf der aggregierten Ebene einen zuverlässigen Stromhandel erlaubt. Die dafür entwickelte Software ist ab 2020 kommerziell verfügbar.

Für die Akteure am Strommarkt entwickelt das Projekt drei Geschäftsmodelle für Stadtwerke, die, je nach Größe und Ambition, den Handel mit aggregierten Netzdienstleistungen erlauben.





# 1. Einleitung

## 1.1 Netzsituation

Die Elektrizitätsversorgung in Deutschland und Europa befindet sich in einem Umbruch. Früher speisten wenige Großkraftwerke Strom auf der Höchst- und Hochspannungsebene ein und übernahmen alle relevanten Netzdienstleistungen wie Frequenz- und Spannungshaltung, Bereitstellung von Kurzschlussströmen, Engpassmanagement und ggf. den Versorgungswiederaufbau. Inzwischen liefern zusätzlich mehr als 1,5 Mio. Anlagen ihren, regenerativ und in Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erzeugten Strom auf allen Spannungsebenen ans Netz. Viele dieser Anlagen dienen auch dem Eigenstromverbrauch von Haushalten und Betrieben, zur Optimierung werden sie immer häufiger von lokalen Batteriespeichern unterstützt, was einerseits das Netz entlasten kann, andererseits die Planung der Netzauslastung erschwert. Solche Akteure werden als Prosumenten (engl. Prosumer) bezeichnet, da sie gleichzeitig Produzenten und Verbraucher sind, indem sie ihren überschüssigen Strom ins Netz einspeisen und fehlenden Strom aus dem Netz beziehen.

Der wachsende Anteil von volatilen Erneuerbaren Energien (Sonne und Wind) im Stromnetz erschwert die Regelung, die zu jedem Zeitpunkt eine Balance zwischen Erzeugung und Verbrauch sicherstellen muss. Die Regularien des Europäischen Verbundnetzes (UCTE) erlauben bei dieser Aufgabe, der Frequenzhaltung, eine Abweichung von  $\pm 0,2$  Hz. Die bekanntesten Instrumente zur Haltung der Netzfrequenz sind die Regelleistung (3 Stufen), der Redispatch (Umplanung von Kraftwerksfahrplänen), abschaltbare Lasten (2 Stufen) und die Abregelung regenerativer Quellen. Da die Erzeugung aus volatilen Quellen nicht planbar, aber mit guter Qualität vorhersagbar ist (Wettervorhersage), verliert die Regelleistung mit dem Stromhandel kurzer Zeitscheiben (heute 15, zukünftig 5 Minuten) an Bedeutung. Dagegen sagen Systemstudien mit wachsendem Anteil an Erneuerbaren Energien im Netz eine überproportionale Zunahme der Abregelung von Wind- und PV-Anlagen voraus. Diesen mit Grenzkosten nahe Null erzeugten Strom zu verwerfen, bedeutet zunächst einen volkswirtschaftlichen Verlust. Dem muss allerdings der Aufwand für die Nutzung der gerade nicht benötigten Elektrizität gegenüber gestellt werden. Betriebswirtschaftlich werden die entgangenen Einnahmen den Erzeugern teilweise über die EEG-Umlage vergütet. Auf der anderen Seite können „überflüssige“ konventionelle Kraftwerke nicht einfach stillgelegt werden, da ihre Leistung zu Zeiten geringer regenerativer Erträge benötigt werden. Die wetterbedingten Extremfälle der regenerativen Stromerzeugung werden bildlich als „helle Brieze“ und „dunkle Flaute“ beschrieben.

Die Volatilität der Erneuerbaren Energien bildet sich, zusätzlich zum globalen Lastgang der Verbraucher, in den Großhandels-Strompreisen ab. Hier sind innerhalb eines Tages kurzfristige Schwankungen zwischen der Hälfte und dem Doppelten des mittleren Preises normal. Überspitzt lässt sich sagen, dass zukünftig nicht mehr die Nachfrage das Angebot bestimmt, sondern das Angebot die Nachfrage – mit gravierenden wirtschaftlichen und technischen Konsequenzen.

## 1.2 Glättung durch Flexibilität

Ein technischer Lösungsansatz zur Beherrschung von Angebotsschwankungen sind Stromspeicher. Hier ist die Rede von Speichern zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen im Bereich von Stunden bis Tagen; saisonale Speicher, die etwa den Jahresgang der solaren Stromerzeugung ausgleichen, stellen eine andere Größenordnung dar und werden an dieser Stelle nicht betrachtet. Solche Kurzzeitspeicher werden jedoch in den nächsten Jahren nicht in nennenswertem Umfang bereitstehen. Sie erfordern hohe Investitionen (Batterien) und/oder weisen in ihrer Prozesskette große Verluste auf (Power-to-X), so dass sie beim heutigen Preisgefüge nicht wirtschaftlich betrieben werden können. Die klassische Lösung, Pumpspeicherkraftwerke sind durch die Standortwahl und die Genehmigungsverfahren momentan im Ausbau sehr eingeschränkt. Neue technologische Ansätze wie „Gravity Power“ (<http://www.gravitypower.net/>) befinden sich noch in der Demonstrationsphase.

Das Projekt VK\_Koop verfolgt dagegen einen anderen, geringinvestiven Ansatz, der organisatorische Maßnahmen für Verbraucher und Erzeuger in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) umsetzt. Den Ausgangspunkt bildet die theoretische Erkenntnis, dass sich die Verschiebung einer Last oder Erzeugung analog zu einem physischen Stromspeicher beschreiben lässt. Die Speicherung der Energie erfolgt dabei in (Zwischen-) Produkten, Dienstleistungen oder als Wärme bzw. Kälte in Pufferspeichern bzw. direkt in Gebäuden. Auf diese Weise kann, aus Sicht des Netzes, die Funktion von Speichern auch ohne reversible Medien realisiert werden. Die beschriebene Analogie lässt sich noch weiter führen, indem jeder virtuelle Speicher durch seine Kapazität, Speichergüte, Lade- und Entladeleistung charakterisiert wird.

Die Voraussetzung für die Verschiebung von Lasten und Erzeugungen sind flexible Abläufe, welche auf die Erfordernisse des Netzes reagieren können. Lastverschiebungen sind heute schon ein häufig verwendetes Instrument, das sich für unterschiedliche Zwecke einsetzen lässt. Ein gern zitiertes Beispiel sind Smart-Home-Anwendungen, die den Eigenstromverbrauch aus einer PV-Anlage optimieren sollen, etwa eine Waschmaschine, die ihren Strom dann aus der Anlage bezieht, wenn diese ausreichend Leistung liefert. In produzierenden Betrieben sind Verschiebungen zum Zwecke des Lastmanagements eine verbreitete Strategie, um die Netzentgelte zu optimieren. VK\_Koop entwickelt eine systematische Herangehensweise, die Flexibilität in Unternehmen zum Zweck eines netzdienlichen Betriebs identifiziert und bewertet<sup>1</sup>. Zur besseren Übertragbarkeit wird dies durch die Modellierung von Produktionsprozessen unterstützt.

Wenn die vorhandene Flexibilität nun so genutzt wird, dass zu Zeiten eines hohen regenerativen Angebots (tiefer Preis) viel Strom aus dem Netz verbraucht und wenig eingespeist, umgekehrt zu Zeiten eines geringen regenerativen Angebots (hoher Preis) wenig verbraucht und viel eingespeist wird, so vermeidet dies Abregelungen und damit CO<sub>2</sub>-Emissionen aus konventionellen Kraftwerken. Gleichzeitig können die Kosten des Strombezugs sinken, wenn der Versorger die Preisschwankungen an der Strombörse an seine Kunden weiterreicht. Abstrakt gesprochen vermarktet das Unternehmen sein Koppelprodukt Flexibilität, via Versorger, an der Strombörse.

Ein solches Szenario ist vorstellbar, wenn zukünftig mit dem Smart Meter allen Kunden auch zeitvariable Tarife angeboten werden. Die aktuelle Smart-Meter-Diskussion kreist allerdings vornehmlich um die CLS-Schnittstelle des Smart-Meter-Gateway, über die Netzbetreiber eine Fernsteuerung einzelner Abnehmer etablieren können. Beide Vorgehensweisen, Preissignal und CLS, machten allerdings lediglich die sofort verfügbare, sogenannte „ad hoc Flexibilität“ nutzbar. Das Gros der flexiblen Lasten und Erzeugungen ist jedoch in Prozessketten eingebunden und muss deshalb auf dem Umweg über die Produktionsplanung aktiviert werden. Dabei werden die geplanten Lastverläufe anhand von Preisprognosen optimiert. Der gewählte Ansatz macht deutlich, dass Flexibilität ein Bündel von Freiheitsgraden darstellt, die es erlauben, den Zeitpunkt der Ausführung und den Betriebspunkt von Prozessen so zu wählen, dass sie ein optimales Ergebnis liefern – nach Maßgabe der angelegten Kriterien.

### 1.3 Virtuelle Kraftwerke

Das Projekt VK\_Koop verallgemeinert den oben beschriebenen Ansatz in mehrere Richtungen. Zum einen ist die Systemgrenze nicht der Netzanschlusspunkt, sondern das Netz wird in die Betrachtung einbezogen; zum andern wird nicht ein einzelner Betrieb betrachtet, sondern ein Ensemble von Betrieben, die ihre Aktionen koordinieren. Die Betriebe vereinigen sich so zu einem Virtuellen Kraft-

---

<sup>1</sup> Ein ähnlicher Ansatz ist in der VDI 5207 [VDI5207] beschrieben, die unmittelbar vor Projektende als Entwurf erschien. Dort liegt der Fokus allerdings auf der Diskussion von Wechselwirkungen, ein Handlungsleitfaden fehlt.

werk (VK), das Netzdienstleistungen erbringen kann – analog zu einem konventionellen Kraftwerk oder einem Pumpspeicher.

Der Begriff der Netzdienstleistung ist vielfältig und hängt von der betrachteten Spannungsebene ab, wobei durchaus Konflikte zwischen den Erfordernissen der Übertragungs- und Verteilnetze entstehen können<sup>2</sup>. Da das VK selbst kein Netz betreibt, handelt es mit vermarktbareren Netzdienstleistungen und nimmt keinen Einfluss auf Regeleinriffe der Netzbetreiber.

Damit das VK seine Dienstleistungen erbringen kann, müssen die Teilnehmer ihre Aktionen über einen Betreiber koordinieren. Im Gegensatz zu anderen Modellen, die zahlreiche, meist Klein-KWK, Anlagen von einer Leitwarte aus fernsteuern, übt der Betreiber im kooperativen Modell keinen steuernden Eingriff auf die Betriebe aus. Er schließt mit den Betrieben Verträge über Bezug bzw. Lieferung von Elektrizität ab. Die Unternehmen behalten damit die vollständige Kontrolle über ihre Prozesse und Daten. Dies ist wichtig, um für das Kerngeschäft der Betriebe die höchste Priorität und den Schutz des Know-how zu gewährleisten. Der Betreiber ist jedoch für die Implementation der VK-Software und die Kommunikation verantwortlich.

Um an den Strommärkten aktiv werden zu können, benötigt das VK noch eine Schnittstelle zur Außenwelt, den sog. Aggregator. Dieser versorgt die Teilnehmer des VK mit den notwendigen Informationen für ihre Planung und vermarktet ihre Dienstleistungen.<sup>3</sup>

Bisher ist der VK\_Koop-Ansatz ganz allgemein gehalten und umfasst Strommengen genauso wie Blindleistung oder Regelleistung etc. Die untersuchten Beispiele konzentrieren sich jedoch auf Strommengen, die an der Strombörse für den nächsten Tag, am sog. Day-Ahead-Markt, gehandelt werden. Hierfür gibt es historische Daten, die für die Modellrechnungen genutzt werden können. Die Daten, welche die Teilnehmer für ihre betriebsinterne Planung erhalten, sind in dieser Konstellation auch klar definiert. Es ist eine Prognose des Strompreisverlaufs für die nächsten Tage sowie eine Wetterprognose, falls sie selbst PV oder Windenergie betreiben. Der Aggregator erhält dann von den Unternehmen den geplanten Lastverlauf bzw. Erzeugungsplan, den er für die Betriebe ordern kann. Die deutschen Strommärkte sind streng reguliert, sowohl technisch wie wirtschaftlich. Um ihre Dienstleistungen erfolgreich vermarkten zu können, müssen sowohl die Betriebe, die Flexibilität

<sup>2</sup> Die Regulierung der Stromnetze sieht eine strikte Trennung zwischen Verteil- und Übertragungsnetz vor. Das Projekt DA/RE der TransnetBW und Netze BW (<https://www.dare-plattform.de/>) entwickelt eine Plattform, die beim Redispatch Maßnahmen verhindern soll, die das jeweils andere Netz negativ beeinflussen.

<sup>3</sup> Nach Projektende erhielten wir Kenntnis vom EFRE-Projekt Happy Power Hour (HPH) [Mee2019], das einen analogen Ansatz zu VK\_Koop verfolgt. Der zentrale Unterschied in der Herangehensweise liegt in der Optimierung der Flexibilität, dies erfolgt in HPH auf der Ebene des Pool-Managers. Dadurch ergeben sich eine Reihe von Vor- und Nachteilen gegenüber dem VK\_Koop-Ansatz:

- + Nur ein Optimierer wird benötigt, damit ergibt sich ein
- + geringerer Aufwand an Hardware und Rechenzeit sowie eine
- + schlankere Kommunikation
- + ohne Iterationen und Konvergenzprobleme

dem stehen allerdings Einschränkungen gegenüber

- der Focus liegt auf ad-hoc-Flexibilität und dem Intraday-Markt
- die Optimierung erfolgt nur auf Basis der Stromkosten
- die Betriebe geben einen definierten Teil der Prozesskontrolle (z.B. Startzeit) ab

Die Arbeit zeigt, dass die Flexibilitätsnutzung bei KMU noch am Anfang steht, im FuE-Bereich aber schon an unterschiedlichen Konzepten gearbeitet wird.

## Einleitung

anbieten, als auch VK-Betreiber bzw. Aggregatoren Geschäftsmodelle entwickeln, welche sich im Rahmen der bestehenden Regularien auskömmlich betreiben lassen. Hierfür entwickelt das Projekt beispielhafte Lösungen, die auch kleine Stadtwerke nicht überfordern. Darüber hinaus zeigen die Beispiele auch Hemmnisse auf, welche die bestehende Regulierung sowie der Zugang zu den Handelsplätzen verursachen. Der Ansatz einer regulatorischen Innovationszone kann solche Hemmnisse im lokalen Kontext überwinden, die Ausweitung auf den gesamten Stromhandel in Deutschland bzw. Europa würde den Rahmen des Projekts jedoch sprengen.

## 2. Arbeitspaket 1: Teilnehmerauswahl und -ansprache

Der erste Schritt beim Aufbau eines Virtuellen Kraftwerks (VK) besteht in der Akquisition der Teilnehmer. Das Projekt VK\_Koop konzentriert sich dabei auf kleine und mittlere Betriebe (KMU) und grenzt sich damit einerseits von Geschäftsmodellen ab, die zahlreiche kleine Anlagen von einer gemeinsamen Leitwarte aus steuern und andererseits von großen Anbietern, die ihre Dienstleistungen selbstständig vermarkten können. Der Kerngedanke des kooperativen Lastmanagements ist die Abstraktion von den konkreten Prozessen. Es wird „nur“ über Stromlieferungen verhandelt. Damit bleibt einerseits die uneingeschränkte Kontrolle über Daten und Abläufe bei den Teilnehmern, andererseits ist der Ansatz nicht auf eine Branche beschränkt. Im Gegenteil, Diversifikation kann das Portfolio des Virtuellen Kraftwerks robust gestalten.

### 2.1 Anforderungsprofil

Die wichtigste Voraussetzung für die Teilnahme an einem VK ist die Bereitschaft der Geschäftsführung, ein neues (Koppel-) Produkt, Flexibilität beim Verbrauch und der Erzeugung<sup>4</sup> von Elektrizität, zu entwickeln, das sich im Stromhandel vermarkten lässt. Für die meisten KMU ist das ein ganz neues Feld und die folgenden zwei Kapitel werden auf die Umsetzung eingehen. Momentan erfordert der Einstieg noch ein hohes Maß an Innovationsbereitschaft.

Die zweite Voraussetzung ist die genaue Kenntnis der eigenen Prozesse. Qualität und Termintreue besitzen in jedem Unternehmen höchste Priorität. Diese dürfen durch die Nutzung von Flexibilität keine Einschränkung erfahren. Die beiden folgenden Kapitel zeigen das systematische Vorgehen von der technischen Flexibilität, die aus Lastgängen und Datenblättern erschlossen werden kann, bis zur vermarktbareren Flexibilität, welche Kosten, Erlöse und die aktuellen Randbedingungen berücksichtigt. Dies kann nur in enger Kommunikation mit den Prozessverantwortlichen gelingen.

### 2.2 Instrumente

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde ein mehrstufiges Vorgehen zur Akquisition neuer Teilnehmer am VK entwickelt. Die Basis dafür waren hauptsächlich Experteninterviews mit unabhängigen Sachverständigen aus Produktion und Unternehmensberatung sowie mit allen Musterbetrieben im Zeitraum Juli 2017 bis November 2019.

#### 2.2.1 Markteinschätzung und Motivation

Die meisten Interview-Partner stimmten drei Hauptaussagen zu:

- Der Mittelstand ist heute schon überwiegend flexibel
  - Verschiebungen von Standardabläufen sind aus unterschiedlichen Gründen üblich
  - Höchste Priorität hat immer der Kundenwunsch
  - Bei der derzeitigen hohen Auslastung bleibt wenig Zeit für Innovationen
- Stromhandel
  - Strom ist nur selten ein relevanter Kostenfaktor
  - Beim Stromeinkauf wird meistens eine günstige Vollversorgung angestrebt
  - Auch Netzentgelte (Leistungspreise) sind selten ein Thema, Ausnahmen bilden extreme Lastspitzen, z.B. beim Anfahren von langlaufenden Anlagen
  - Flexibilitätsmärkte sind nicht im Bewusstsein der Unternehmen

---

<sup>4</sup> Zur sprachlichen Vereinfachung wird zukünftig meistens von „flexiblen Verbrauchern“ die Rede sein. „flexible Erzeuger“ können allerdings immer mitgedacht werden.

- Versorgungssicherheit und –Qualität
  - Bedenken wegen abnehmender Versorgungssicherheit sind gering
  - Die Versorgungsqualität wird ganz überwiegend positiv beurteilt
  - Oft ist nur IT durch USV abgesichert, wenige Betriebe nutzen Notstromaggregate
  - Auch unbeaufsichtigte Produktion läuft häufig ohne Sicherungseinrichtung
  - Bei Problemen ist die Rolle des Binnennetzes im Betrieb oft nicht klar
  - Es besteht Bereitschaft, einen Beitrag zum Erhalt der Versorgungsqualität zu leisten

Die Interviews bestätigten, dass der Aufwand bei der Akquisition der Musterbetriebe für das Projekt hoch ist, da kein niederschwelliger Einstieg in das Thema Flexibilitätsvermarktung angeboten werden kann.

### 2.2.2 Fragebogen

Als Einstieg in die Diskussion mit Interessenten entstand ein Fragebogen zur Stromnutzung in Betrieben (Anhang 1), der sowohl im Dialog mit dem KMU als auch selbstständig ausgefüllt werden kann. Dabei erfolgt eine erste Bestandsaufnahme, anhand derer sich weitere Schritte planen lassen.

### 2.2.3 Technologiematrix

Das zentrale Instrument für einen vertieften Dialog bildet die Technologiematrix (Anhang 2). Diese enthält die kondensierten Informationen aus den bisher durchgeführten Untersuchungen. Damit erlaubt sie bei der Bewertung der Fragebögen wie auch im Gespräch eine überschlägige Betrachtung von Potentialen und Restriktionen. Anhand der Modellrechnungen mit historischen Börsenpreisen erlaubt dies auch eine Ertragsschätzung.

Dieses Instrument, zusammen mit der Möglichkeit eines Besuchs bei einem aktiven Teilnehmer, fördert die Vertrauensbasis für die weiteren Schritte, die, wie oben beschrieben, gravierende Veränderungen bei einzelnen Prozessen hervorbringen können.

### 2.2.4 Synergien mit Energieeffizienz

Die systematische Erhebung der Flexibilität, wie sie im folgenden Kapitel beschrieben ist, erfolgt weitgehend analog zur Effizienzberatung. Von daher kann man sich auf deren Daten stützen bzw. beide Aufgaben parallel bearbeiten. Durch die öffentliche Förderung der Effizienzverbesserung ergeben sich Synergien, die auch bei der Gewinnung eines der Musterbetriebe im Projekt genutzt wurden.

## 2.3 Fazit

Die beschriebenen Instrumente sind dialogorientiert und wurden bei verschiedenen Tagungen und Informationsveranstaltungen (Wirtschaftsministerium, IHK, Branchenverband) eingesetzt. Aus den Diskussionen ergaben sich auch Kontakte, welche weiter gepflegt werden. Da die regulatorischen Randbedingungen momentan die Flexibilitätsvermarktung mehr behindern als fördern, steht der Schritt der Umsetzung bei neuen Teilnehmern noch aus. Dagegen haben drei der Musterbetriebe Interesse an einer Lizenzierung der Methode geäußert, da sie im Projektverlauf weitere Vorteile für ihre Produktionsplanung darin erkannt hatten.

## 3. Arbeitspaket 2 & 3: Erfassungsmethode und Detailuntersuchung

Ziel der Arbeitspakete 2 & 3 ist es, die Methoden zur Erfassung von grundlegend benötigten Daten für die Vorauswahl von Flexibilität darzustellen. Diese sollen messtechnisch (temporär) untersucht werden, um daraus die dauerhaft zu erfassenden Parameter für die Nutzung als flexible Last zu identifizieren. Die Methoden zur Erfassung finden – je nach Datenlage – Anwendung in den fünf am Projekt teilnehmenden Musterbetrieben.

### 3.1 Aufgabenstellung der Arbeitspakete

#### 3.1.1 Arbeitspaket 2

Die Hauptaufgabenstellung des Arbeitspaketes 2 besteht in der Entwicklung einer grundsätzlichen Vorgehensweise zur Identifikation und Erfassung von Flexibilität unterschiedlicher Last- und Erzeugungskapazitäten. Flexibilität ist in der Definition des vorliegenden Projektes eine elektrische Last oder Erzeugungskapazität, welche sich zeitlich verschieben lässt (z.B. durch die Nutzung von Speichern verschiedener Art oder durch die Verschiebung eines gesamten Prozesses) oder welche durch eine angepasste Betriebsführung moduliert werden kann (z.B. die Leistungsaufnahme eines Härteofens in Abhängigkeit der Aufheizdauer). Die Kapazitäten sollen zudem qualitativ bewertet werden, um deren möglichen Nutzen abzuschätzen. Der Einsatz der Kapazitäten kann in mehrerer Hinsicht bewertet werden: Anhand der Möglichkeit, Leistung für den Einsatz am Regelleistungsmarkt bereitzustellen oder im Hinblick auf den flexiblen Betrieb einer Anlage mit dem Ziel, Einsparungen durch veränderliche Strompreise im Vergleich zu einer Vollversorgung mit einem nicht veränderlichen Strompreis zu erreichen. Da momentan der Regelleistungsmarkt weniger lukrativ ist, wird der Schwerpunkt der Untersuchung auf Anlagen gelegt, welche durch eine Day-Ahead- oder Intraday-Optimierung Erlöse durch veränderliche Strompreise erzielen können.

#### 3.1.2 Arbeitspaket 3

In Arbeitspaket 3 sollen die in Arbeitspaket 2 identifizierten Flexibilitäten detailliert untersucht werden, um Betriebsweisen exakt zu erfassen und sich daraus ergebende Optimierungspotenziale vorzuschlagen und zu bewerten. Zudem werden die zu erfassenden Parameter festgelegt, welche für eine dauerhafte Nutzung als flexible Kapazität benötigt werden.

#### 3.1.3 Ergebnisverarbeitung der Arbeitspakete 2 & 3

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 & 3 sollen genutzt werden, um eine Technologiematrix zu erstellen, welche die Schnittstelle der Betriebe zum Virtuellen Kraftwerk beschreibt. Anhand der Technologiematrix sollen neue Interessenten in einer Art „Schnellcheck“ bewerten können, ob sich für den Einsatz in einem Virtuellen Kraftwerk geeignete flexible Kapazitäten unter ihren Anlagen befinden. Die Technologiematrix soll Anlagen, Prozesse und Speicher inklusive deren Parameter vereinen und bewertet diese hinsichtlich ihrer Eignung als flexibler Last. Auch Informationen zur möglichen Skalierung sollen erhoben und hinterlegt werden. Somit soll mit der Technologiematrix eine Methodik entwickelt werden, mit welcher flexible Kapazitäten in Betrieben auch ohne aufwendige (messtechnische) Untersuchung identifiziert und für eine Detailuntersuchung präqualifiziert werden können.

### 3.2 Methodenbeschreibung der Flexibilitätsauswahl

Um bereits im Vorfeld einer Begehung relevante Informationen über die einzelnen Kooperationspartner und deren Anlagen zu erhalten, wurde in AP1 ein Fragebogen entwickelt. Diesen haben die Musterbetriebe und auch spätere Interessenten zu Beginn eines Projektes erhalten. Der Fragebogen

erhebt allgemeine Daten wie den Energieverbrauch des letzten Jahres oder den maximalen Leistungsabruf aus dem öffentlichen Stromnetz. Auch die Nutzung von internen Managementsystemen, wie z.B. eines Last- oder Energiemanagements wird erfasst. Anhand der Ergebnisse wird ein Termin vor Ort vorbereitet. Dort werden vertiefte Fragen zu einzelnen Angaben aus dem Fragebogen gestellt. Insgesamt wurden im Projekt drei hauptsächliche Quellen für die Erhebung relevanter Anlagen- und Prozessdaten identifiziert, welche nachfolgend dargestellt werden.

### 3.2.1 Extraktion der Daten aus ISO 50001 / DIN EN 16247

Unternehmen über der KMU-Schwelle [KMU2015] sind nach dem EDL-G verpflichtet, bis zum 05.12.2015 erstmalig ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 [EN16247] durchzuführen oder alternativ ein entsprechendes Energie- oder Umweltmanagementsystem zu betreiben (EMAS oder ISO 50001) [ISO50001]. Gemeinsam haben diese Managementsysteme, dass mindestens die relevanten energieverbrauchenden Anlagen erfasst werden müssen. Aus dieser Erfassung können im Vorfeld bereits wichtige Parameter (wie z.B. installierte elektrische Leistung, ungefähre Laufzeit, Auslastung der Anlage und Energieverbrauch) ausgelesen werden. Mit diesen Informationen kann bereits eine grobe Vorauswahl getroffen werden, was die weitere Untersuchung bestimmter Maschinen oder Anlagen betrifft. Gelistete Anlagen, welche eine sehr geringe Leistung im Sinne möglicher Lastverschiebungen aufweisen (z.B.  $\leq 50$  kW installierter Leistung) können meistens zugunsten größerer Anlagen aus der Untersuchung ausgeklammert werden. Bei Anlagen mit großer installierter Leistung ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass ein relevanter Anteil der Leistung als flexible Last genutzt werden kann. Ebenfalls können Anlagen mit sehr hohen Laufzeiten aus der Untersuchung ausgeschlossen werden, da sich hier keine Möglichkeit ergibt, die Nutzungszeiten zu verschieben. Auch in einen Prozess, welcher nicht ohne negative Auswirkungen auf vor- und/oder nachgelagerte Prozesse verändert oder unterbrochen werden kann oder welcher dauerhaft in Betrieb ist, kann nicht im Hinblick auf Flexibilität eingegriffen werden. Ebenso sind Prozesse mit kurzen Leistungsunterschieden (im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten) bei dieser Betrachtung ausgeschlossen worden. Diese lassen sich nicht in dem der Betrachtungen zugrunde gelegten 15-Minuten-Raster der Strompreisvariation als Flexibilität nutzen. Der größte Nachteil der Datenextraktion aus diesen Systemen besteht darin, dass meist keine zeitlichen Muster der Leistungsnachfrage vorliegen und keine Restriktionen erfasst werden. Nur mit Daten aus dem Managementsystem oder dem Energieaudit kann der exakte Betrieb bestimmter Kapazitäten nicht nachverfolgt werden bzw. können ohne Lastgänge keine Optimierungsberechnungen stattfinden.

### 3.2.2 Erhebung der Daten aus einem Lastmanagementsystem

Da der spezifische Leistungspreis (EUR/kW) einen hohen Anteil der Stromkosten produzierender Betriebe ausmachen kann (abhängig von Energieverbrauch und der höchsten Lastspitze im Vorjahr sowie dem Sitz des Unternehmens), betreiben einige Unternehmen ein internes Lastmanagementsystem. Dieses wird jedoch bisher nur für das sogenannte „Peakshaving“ eingesetzt. Hierbei werden Anlagen nach einer Prioritätsliste vom Netz genommen, sobald sich der gesamte Leistungsbezug einer festgesetzten Grenze annähert. Diese Methode optimiert den Stromlastbezug eines Unternehmens in Bezug auf die Spitzenlast, berücksichtigt aber sonst keine weiteren Anforderungen von z.B. vorgelagerten Netzen. Beim Musterbetrieb Mayer & Cie ist ein internes Lastmanagementsystem für die Vermeidung von Spitzenlasten in Betrieb. Hier sind bereits viele der Anlagen (hauptsächlich für die Produktion unkritische Querschnittstechnologien) in einer Prioritätsliste mit Restriktionen für den Betrieb hinterlegt. Durch die Nutzung dieses Systems konnte die Firma die Lastspitzen bereits von ca. 2 MW auf ca. 1,5 MW senken. Anhand der getesteten Auswirkungen der Abschaltung einzelner Anlagen sowie den daraus resultierenden Restriktionen und den hinterlegten Anlagendaten können für das Projekt relevante Anlagen aus dem Lastmanagement ausgewählt und genauer untersucht werden. Diese Methodik der Datenextraktion ist auf andere Lastmanagementsysteme übertragbar, sofern Anlagen mit Daten und Restriktionen hinterlegt sind. Da bei einem Lastmanagement-



system neben den festgelegten Restriktionen auch ein steuernder Zugriff auf die angeschlossenen Anlagen vorhanden ist, sind die Informationen und technischen Gegebenheiten aus solchen Systemen oftmals für den Einsatz in Bezug auf flexible Lasten nutzbar.

### 3.2.3 Begehung und Datenerhebung

Wenn keines der in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Systeme vorhanden ist, müssen relevante Prozess- und Verbraucherdaten bei einer Begehung vor Ort erhoben werden. Hierbei soll die zu entwickelnde Technologiematrix unterstützen. Im Projekt wurde bei allen Musterbetrieben eine Begehung vor Ort durchgeführt, um die bereits vorliegenden Daten zu validieren und tiefergehende Fragen zu Anlagen und Prozessen zu stellen. Von besonderem Interesse dabei war, ob die Begehung und die Diskussionen mit dem Betriebspersonal die erste Einschätzung aus der Daten-Extraktion bestätigt oder ob Ergänzungen nötig werden bzw. Widersprüche auftreten. Auch die spezifischen Restriktionen von Anlagen oder ganzen Prozessen können durch die Begehung erhoben bzw. validiert werden. Aus der Zusammenführung der Informationen können die Qualität der Quellen und die Nutzbarkeit der Daten eingeschätzt werden.

## 3.3 Holcim (Süddeutschland) GmbH

### 3.3.1 Kurzbeschreibung

Die Holcim (Süddeutschland) GmbH stellt Zement und Spezialbindemittel sowie Kies und Beton her. Holcim verfügt am untersuchten Standort über mehrere leistungsstarke Energieerzeugungsanlagen sowie Verbrauchsgroßanlagen mit jeweils mehreren Megawatt elektrischer Leistung. Hierbei handelt es sich auf der Verbraucherseite z.B. um diverse Mühlen und auf der Erzeugerseite um Turbinen und Dieselaggregate. Bei Holcim ist ein umfassendes Leitsystem im Einsatz, auf welches ein Großteil der Maschinen aufgeschaltet ist und über welches Informationen und auch Betriebsparameter der einzelnen Anlagen abgerufen werden können. Aus diesen internen Systemen wurden Daten für die Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

### 3.3.2 Untersuchte Anlagen

Anhand der vom Unternehmen zur Verfügung gestellten Angaben zu Energieverbräuchen, Anlagen und Prozessabläufen konnte bereits vor einem ersten Termin vor Ort eine Abschätzung möglicher Flexibilitätspotenziale getroffen werden. So konnten Anlagen, welche nahezu 8.760 Stunden pro Jahr in Betrieb sind, von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Auch Anlagen, welche neben der Funktion als Produktionsanlage Nebenfunktionen, wie z.B. Emissions-Absorption haben, mussten aufgrund der daraus resultierenden Restriktionen von der Untersuchung ausgeschlossen werden. Tiefergehend wurden hauptsächlich die großen Mühlen untersucht, da deren Restriktionen relativ gering sind und sich hier im Zusammenspiel mit Materialspeichern eine Lastverschiebung ohne Einschränkungen der täglichen Produktionsmenge erzielen lässt. Da die Antriebsleistung der Mühlen bei mehreren MW<sub>el.</sub> liegt, können durch den optimierten Betrieb erhebliche Einflüsse auf Parameter des internen Netzes und vorgelagerte Netze ausgeübt werden. Auch auf die Energiekosten des Produktionsprozesses hat die Optimierung deutliche Einflüsse, sofern durch die flexible Betriebsweise volatile Strompreise genutzt werden können.

### 3.3.3 Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse

Nachfolgend werden die beim Musterbetrieb detailliert untersuchten Flexibilitäten sowie deren zu erfassende Parameter für die dauerhafte Nutzung als flexible Last dargestellt.

### 3.3.3.1 Zementmühlen (ZM)

Anhand der Datenanalyse wurde festgestellt, dass die Zementmühlen das am besten zu hebende Flexibilitätspotenzial von einzelnen Anlagen in einem komplexen Produktionsprozess bieten. Der Betrieb der ZM ist von diversen vor- und nachgelagerten sowie Nebenprozessen abhängig. Am Ende eines Produktionszyklus muss eine vorgegebene Menge eines vorgegebenen Produkts erzeugt worden sein. Jedoch ist dabei von weniger Bedeutung, zu welcher Tageszeit das Produkt erzeugt wird, solange Produktspeicherfüllstände ausreichend voll gehalten werden. Weitere Restriktionen werden durch die Sorte des zu erzeugenden Produkts vorgegeben, da die Bearbeitungsgeschwindigkeit und die Unterbrechbarkeit des Prozesses nicht bei jedem Produkt gleich sind. Durch die hohe elektrische Anschlussleistung der Anlagen und die Optimierung hin auf einen am Ende eines Produktionszyklus zu erreichenden Speicherfüllstand kann der Prozess gut über einen Tag in einem 15-Minuten-Raster verschoben werden. Da die Anlagen hauptsächlich automatisch betrieben werden und es keinen zusätzlichen Personalaufwand für den Betrieb der Anlagen gibt, ist die Eignung als flexible Last auch auf der Kostenseite gegeben. Der flexible Betrieb innerhalb eines Tages zu jeweils Zeiten mit voraussichtlich geringen Strompreisen ermöglicht Kosteneinsparungen durch volatile Strompreise.

#### Zu erfassende Parameter

Um eine Zementmühle als flexible Last einzusetzen, müssen folgende Parameter erfasst werden:

- Speicherfüllstand Ausgangsmaterial
- Speicherfüllstand Endprodukt
- Momentanleistung der Mühle
- Nennleistung je Zementsorte
- Mindestbetriebsdauer
- Abhängigkeit von anderen Mühlen
- Unterschiedliche Rohmaterialien für verschiedene Zementsorten

### 3.3.3.2 Dieselstromaggregate

Die am Standort vorhandenen Dieselstromaggregate werden bereits für Regelleistung vermarktet. Eine Nutzung für den Einsatz als flexible Last ist generell möglich, die Voraussetzungen hierfür sind bereits gegeben.

#### Zu erfassende Parameter

Es müssen keine weiteren Parameter erfasst werden. Anhand der bekannten installierten Leistung sowie des bekannten An- und Abfahrverhaltens können die Anlagen durch eine Aufschaltung auf ein entsprechendes Steuerungssystem als flexible Last eingesetzt werden.

## 3.4 Mayer & Cie GmbH & Co. KG

Die Firma Mayer & Cie stellt seit 1905 Rundstrickmaschinen in verschiedensten Formen und Ausführungen her. Die Entwicklung und Produktion finden zu großen Teilen am Standort Albstadt statt. Im Unternehmen sind seit vielen Jahren ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 sowie ein Lastmanagementsystem implementiert, aus welchen die Anlagendaten übernommen wurden.

### 3.4.1 Untersuchte Anlagen

Bei der Firma Mayer & Cie sind diverse Querschnittstechnologien an das Lastmanagementsystem angebunden. Es ist aktuell eine maximale Bezugsobergrenze von 1.500 kW festgelegt, um die Leistungskosten möglichst gering zu halten. Sobald sich der Bezug der Grenze von 1,5 MW nähert, werden Anlagen nach einer Prioritätsliste heruntergefahren und gestaffelt wieder in Betrieb genommen. Für jede Anlage am Lastmanagement gibt es hinterlegte Restriktionen, wie z.B. die Mindest- und

Höchstausschaltdauer abhängig von den Auswirkungen auf die nachfolgenden Systeme. Durch den Einsatz des Lastmanagementsystems konnte die maximale Lastspitze erfolgreich von ca. 2 MW auf 1,5 MW abgesenkt werden. Anlagen, bei welchen Potenzial zur flexiblen Nutzung vermutet wurde und welche nicht an das Lastmanagementsystem angebunden sind, wurden bei der Begehung vor Ort aufgenommen und untersucht.

### 3.4.1.1 Teilereinigung

Die Teilereinigungsanlage dient zur Reinigung der produzierten Bauteile. Diese werden von Spänen und Schmiermitteln gesäubert, indem sie in Behältern durch die Reinigungsanlage geführt werden. Vor und nach der Anlage gibt es die Möglichkeit zur Speicherung von Material. Die Anlage hat eine gesamte installierte Leistung von 70 kVA, die Leistung der integrierten elektrischen Heizung beträgt 45 kW. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage mit den vor- und nachgelagerten Materialspeichern zeitlich flexibel betrieben werden kann, da die zu reinigenden Teile nicht immer sofort nach der Produktion in den Reinigungsprozess müssen. Die Heizelemente entsprechen aufgrund ihrer schnellen Reaktion auf eine Leistungsanforderung den Kriterien für die Bereitstellung von flexibler Leistung. Um die Betriebsweise und die verfügbare Leistung detaillierter einschätzen zu können, wurden Leistungs-Messungen über mehrere Reinigungszyklen an dieser Anlage vorgenommen.

### 3.4.1.2 Liftsystem

Im Lager gibt es mehrere Hochlagersysteme mit Lifts. In diesen werden diverse Teile eingelagert und bei Bedarf vom Lift aus dem Hochlager geholt. Die Untersuchung der Anlagen soll Aufschluss über die beim Ein- und Auslagerungsprozess entstehenden Lasten geben und die Bewertung des Einsatzes als flexible Last ermöglichen. So kann z.B. der Betrieb der Anlagen zur Lagersortierung ohne Personal flexibel gestaltet werden.

## 3.4.2 Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse

Nachfolgend werden die beim Musterbetrieb detailliert untersuchten Flexibilitäten sowie deren zu erfassende Parameter für die dauerhafte Nutzung als flexible Last dargestellt.

### 3.4.2.1 Teilereinigung

Die Teilereinigungsanlage lässt sich mit geringem Aufwand als flexible Last einsetzen. Restriktionen bestehen hauptsächlich in der Zeitspanne, in welcher ein flexibler Einsatz ohne zusätzlichen Personalaufwand möglich ist. Bis zum Ende der täglichen Arbeitszeit müssen die vorhandenen Bauteile gereinigt sein. Das Verschieben der Reinigungsvorgänge muss genau geplant werden, da die Anlage nicht vollautomatisch betrieben werden kann. Bei einer Anlage in der vorhandenen Größenordnung übersteigt der zusätzliche Personalkostenaufwand mit hoher Wahrscheinlichkeit die Erlöse, wenn bestimmte Arbeitszeiten überschritten werden. Eine Optimierung innerhalb der vorgegebenen Zeiten mit Personalanwesenheit muss demnach darauf ausgerichtet werden, dass am Ende der vorgegebenen Zeit der Materialspeicher mit ungereinigten Bauteilen vor der Anlage geleert ist und alle Bauteile gereinigt sind. Dabei ist ebenfalls zu beachten, dass der Materialspeicher vor der Anlage nur eine beschränkte Kapazität hat und dieser kontinuierlich vom vorgelagerten Produktionsprozess gefüllt wird.

### Zu erfassende Parameter

Der Einsatz einer solchen Reinigungsanlage als flexible Last ist möglich, wenn folgende Parameter ständig erfasst werden:

- Füllstand des Materialspeicher vor der Anlage
- Noch offene Reinigungsdurchläufe für den Tag bis zum Ende der regulären Arbeitszeit

### 3.4.2.2 Querschnittstechnologien

Da bei Mayer & Cie bereits ein gut funktionierendes Lastmanagementsystem vorhanden ist, können prinzipiell alle daran teilnehmenden Anlagen als flexible Last eingesetzt werden. Vor einem Einsatz müssen jedoch die bekannten Restriktionen der einzelnen Technologien mit den Anforderungen der Flexibilität abgeglichen werden. Im vorliegenden Fall sollte Testweise eine Klimaanlage mit Büroräumen als Kältespeicher als flexible Last genutzt werden. Aufgrund der Inkompatibilität der vorhandenen Schnittstelle mit der Schnittstelle der Optimierungssoftware und der hohen Kosten für die Freischaltung konnte der Test jedoch nicht durchgeführt werden.

## 3.5 Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanztechnik KG

### 3.5.1 Kurzbeschreibung

Kocher + Beck wurde im Jahr 1965 als GbR in Stuttgart gegründet. Seit 1989 liegt der Hauptsitz mit Entwicklung und Produktion in Pliezhausen. Am Standort ist neben diversen CNC-Bearbeitungszentren eine Galvanik-Anlage in Betrieb. Hauptsächlich werden Produkte für die Oberflächenbearbeitung entwickelt, produziert und eingesetzt. Das Unternehmen ist nach DIN EN 16247-1 auditiert. Aus den Auditunterlagen konnten Daten zu Energieverbräuchen und Anlagen entnommen werden.

### 3.5.2 Untersuchte Anlagen

#### 3.5.2.1 Entfettungsanlage

In der Produktion gibt es eine Entfettungsanlage für das Platten-Rohmaterial, dessen Oberflächen vor der weiteren Bearbeitung entfettet werden müssen. Die Platten werden zu Beginn jeder Schicht (3-Schicht Betrieb) vorbereitet. Es ist bei den meisten der Platten möglich, diese für 2-3 Tage zwischenzulagern. Die Anlage wurde in Bezug auf die elektrische Leistungsaufnahme messtechnisch untersucht, da in dem Batch-Prozess mit vor- und nachgelagerter Materialspeicherkapazität ein Potenzial zur Verschiebung und Übertragbarkeit auf größere Anlagen zu erwarten war.

#### 3.5.2.2 Galvanik

Neben der Entfettungsanlage gibt es am Standort eine Galvanik-Anlage, welche eine hohe elektrische Leistung aufweist. Da die Anlage nicht das ganze Jahr ununterbrochen in Produktionsbetrieb ist, sondern nur in bestimmten Zeitfenstern produziert, wird ein Potenzial zur zeitlichen Prozessverschiebung vermutet. Hierbei kann der Betrieb nur mit genauer Vorplanung innerhalb eines großen Zeitfensters optimiert werden, eine Veränderung des Betriebs innerhalb eines 15-Minuten-Rasters ist prozessbedingt nicht möglich. Die Flexibilisierung der Betriebszeiten könnte aber möglicherweise so geplant werden, dass Einfluss auf den gesamten Lastbezug der Firma genommen wird.

#### 3.5.2.3 Klimakälteerzeugung

Neben den Produktionsanlagen wurde die Kälteerzeugung für die Bereitstellung von Klimakälte für den CNC-Bereich untersucht. Die Kombination der durch einen Frequenzumrichter gesteuerten Kälteerzeugung mit einem Kältespeicher lässt die Möglichkeit eines flexiblen Betriebs der Anlage vermuten.

#### 3.5.2.4 BHKW

Das BHKW (15 kW<sub>e</sub>) ist als Dauerläufer ausgelegt und kann nur durch den Einsatz eines größeren thermischen Speichers zeitlich flexibel eingesetzt werden. Bei dieser BHKW-Größe ist die Wirtschaftlichkeit einer weiteren Investition zur Nutzung als flexible Kapazität jedoch nicht gegeben.

### 3.5.2.5 Härteofen

Für die thermische Bearbeitung kleinerer Werkstücke sind zwei Härteöfen in Betrieb.



Abbildung 1: Härteofen  
29 kW, Quelle: Aufnahme  
PATAVO



Abbildung 2: Härteofen  
5,8 kW, Quelle:  
Aufnahme PATAVO

Die Öfen werden nicht durchgängig genutzt, sondern je nach Anforderung in Betrieb genommen. Aufgrund der daraus resultierenden möglichen zeitlichen Flexibilisierung, der schnell reagierenden elektrischen Elemente zur Beheizung sowie der vermutlichen Übertragbarkeit der Ergebnisse auf größere Anlagen wurden die Öfen messtechnisch untersucht.

### 3.5.3 Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse

Nachfolgend werden die beim Musterbetrieb detailliert untersuchten Flexibilitäten sowie deren zu erfassende Parameter für die dauerhafte Nutzung als flexible Last dargestellt.

#### 3.5.3.1 Galvanik

Die Galvanik-Anlage kann nur bei Betrachtung von großen Zeiträumen als flexible Last genutzt werden. Der Prozess an sich ist nicht unterbrechbar, nach einem Start dauert der Zyklus ca. 10 Stunden. Flexibel veränderlich ist nur der Startzeitpunkt der Anlage, welcher vom Aufheizvorgang (Dauer ca. 4 Stunden bei ca. 7 kW Heizleistung) abhängig ist. Der Aufheizvorgang kann durch Anpassen der elektrischen Aufheizleistung variiert werden, der eigentliche Prozess später jedoch nicht. Für den Einsatz als flexible Last innerhalb eines 15-Minuten-Rasters oder geringerer Zeiträume ist die Anlage deshalb nicht nutzbar. Eine Möglichkeit ergibt sich jedoch bei der Betrachtung größerer Zeiträume, z.B. Monate. Denkbar ist, die Anlage je nach Hoch- und Schwachlastfenster des Netzbetreibers zu fahren, um möglicherweise von individuellen Netzentgelten durch Entlastung des Verteilnetzes profitieren zu können (atypische Netznutzung). Hierzu müssen die jährlichen Hoch- und Schwachlastfenster des Netzbetreibers bekannt sein. Zudem muss die Verschiebung der Produktionszeiten innerhalb dieser Zeitfenster möglich sein.

Im folgenden Jahreslastgang (Abbildung 3) sind Produktionsfenster mit erhöhter Last zu erkennen, welche vermutlich von der Galvanik verursacht werden. Wenn die Galvanik in den mit grün markierten Zeiten (Hochlastzeitfenster des Netzbetreibers) abgeschaltet bleiben kann, könnte der Gesamtlastgang als netzdienliche Entlastung innerhalb der Hochlastzeitfenster anerkannt werden und das Netzentgelt (Leistungspreis) reduziert werden.

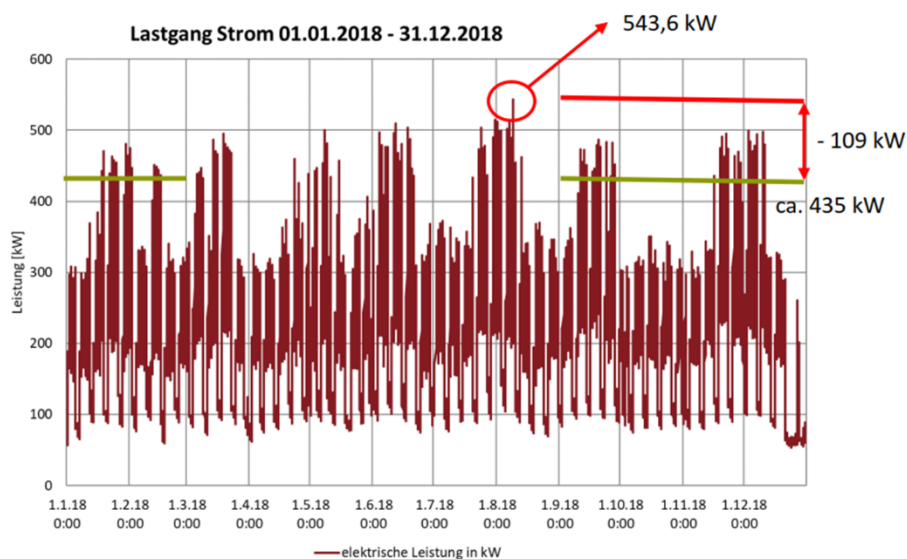


Abbildung 3: Möglicher Einfluss der Galvanik auf den Gesamtlastgang, Quelle: PATAVO

### 3.5.3.2 Härteöfen

Die Härteöfen bei der Fa. Kocher + Beck sind mit 29 kW bzw. 5,8 kW Leistung zu gering für den Einsatz als flexible Last. Dennoch können die Betriebsweise sowie die Parameter für die Nutzung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf größere Anlagen mit ähnlicher Betriebsweise übertragen werden. Größere Anlagen mit leistungsstärkeren thermischen Elementen eignen sich vermutlich sehr gut als flexible Last. Bis zum Erreichen der gewünschten Temperatur kann die Aufheizleistung eines Ofens variiert werden, was je nach Anforderung eine höhere flexible Leistung über eine kurze Zeit oder eine geringere Leistung über eine längere Zeit zur Folge hat. Sobald der Prozess gestartet ist, können Leistungs- und damit Temperaturänderungen nur noch in geringem Umfang zugelassen werden, damit das Produkt nicht unbrauchbar wird.

### Zu erfassende Parameter

Um Härte- und sonstige Öfen als flexible Last nutzen zu können, müssen deren Auslastungen für den Verlauf eines Tages anhand der Menge und der Art der zu bearbeitenden Materialien bekannt sein. Aufgrund dieser Informationen können die flexibel gestaltbaren Aufheizvorgänge in Bezug auf Leistung und Dauer geplant werden.

## 3.6 Franz Tress GmbH & Co. KG

### 3.6.1 Kurzbeschreibung

Das seit 1969 bestehende Unternehmen stellt Teigwaren in verschiedenen Variationen her. Hierfür kommen vollautomatische Produktionsstraßen zum Einsatz. Zur Bereitstellung der benötigten Prozessenergie betreibt die Firma am Standort Münsingen zwei BHKWs. Seit Juli 2017 ist ein Umweltmanagementsystem nach EMAS validiert. Anhand der Anlagenliste sowie einer ergänzenden Datenaufnahme vor Ort konnten die Daten für die Detailanalysen erhoben werden.

### 3.6.2 Untersuchte Anlagen

#### 3.6.2.1 Produktionsstraßen

Es sind mehrere vollautomatische Produktionsstraßen für diverse Teigwaren in Betrieb. Vor und nach den Straßen befinden sich jeweils Speichermöglichkeiten in Form von Teig bzw. Lager für fertig

verpackte Produkte. Die Produktionsgeschwindigkeit der Straßen kann etwas moduliert werden, dies hat aber nach den erhobenen Messdaten eine relativ geringe Auswirkung auf den Leistungsbezug. Eine Verschiebung der Produktionszeiten innerhalb eines Tages ist nicht möglich, da die Anlagen möglichst dauerhaft in Betrieb sein sollen.

### 3.6.2.2 Reinigungsanlage für Teigwaren-Matrizen

Die Teigwaren werden in den Produktionsstraßen über Teigwaren-Matrizen in die gewünschte Form gebracht. Die Matrizen werden in regelmäßigen Abständen in einer speziellen Anlage gereinigt. Diese erwärmt das Spülwasser elektrisch, der Prozess läuft im Batch-Verfahren mit Materialspeichern vor und nach der Anlage ab (benutzte/gereinigte Matrizen). Aufgrund der Möglichkeit des zeitlich flexiblen Einsatzes der Reinigungsanlage und der vermutlich schnell verfügbaren elektrischen Leistung der Heizelemente wird angenommen, dass eine Flexibilität der Anlage gegeben ist.

### 3.6.2.3 BHKW

Am Standort sind zwei BHKWs in Betrieb. Diese sind ursprünglich so konzipiert worden, dass ein nahezu durchgängiger Betrieb für die Bereitstellung von Prozess- und Heizwärme erfolgen soll. Es wurde vermutet, dass die Betriebsweise der Erzeuger im Hinblick auf Flexibilität verändert werden kann, weswegen die vorhandenen Verbrauchs- und Erzeugungsdaten detailliert untersucht wurden. Die Auswertung der Betriebsdaten ergab Wirkungsgrade deutlich unterhalb des Soll-Wertes. Aufgrund der Optimierungsmöglichkeiten wurde die Anlage zunächst auf Betriebsoptimierungs- und in einem zweiten Schritt auf Flexibilitätsmöglichkeiten untersucht.



Abbildung 4: BHKW 1,  
Quelle: Aufnahme  
PATAVO



Abbildung 5: BHKW 2,  
Quelle: Aufnahme  
PATAVO

### 3.6.3 Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse

Nachfolgend werden die beim Musterbetrieb detailliert untersuchten Flexibilitäten sowie deren zu erfassende Parameter für die dauerhafte Nutzung als flexible Last dargestellt. Für die wirtschaftlich sinnvolle Nutzung als Flexibilität eignet sich bei der Firma Tress keine der untersuchten Anlagen, da bei den BHKWs eine Betriebsoptimierung deutlich sinnvoller ist und die anderen Anlagen eine zu geringe flexible Leistung aufweisen.

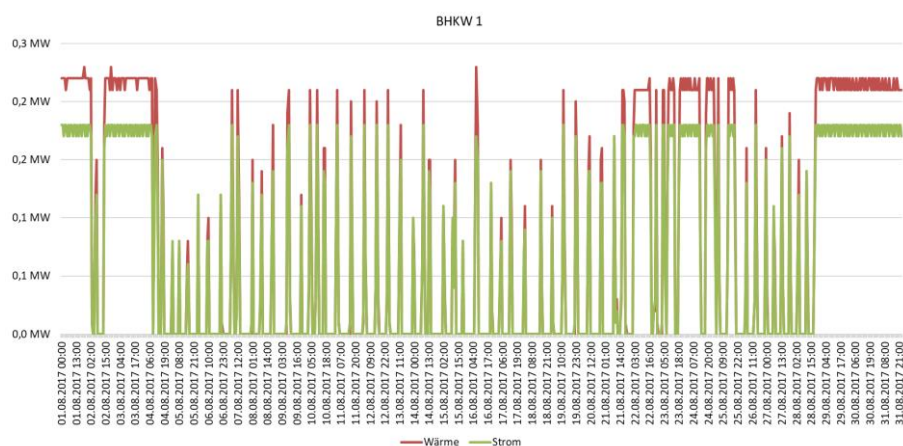


Abbildung 6: BHKW-Betrieb August 2017, Quelle: PATAVO

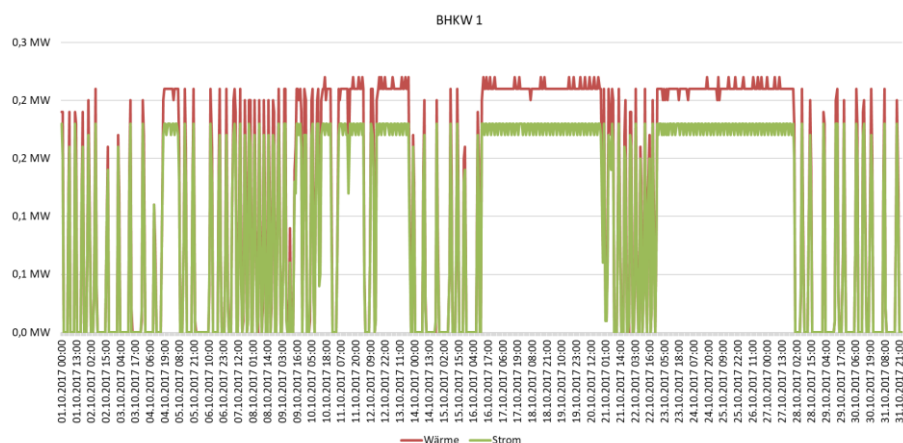


Abbildung 7: BHKW-Betrieb Oktober 2017, Quelle: PATAVO

### 3.6.3.1 BHKWs

Da die BHKWs nach der Auswertung der zur Verfügung gestellten Daten (vor allem außerhalb der Heizperiode, häufiges An- und Abfahren, siehe Abbildung 6 und Abbildung 7) nicht optimal betrieben werden, ist eine Betriebsoptimierung (Optimierung der Hydraulik, Maßnahmen zur Absenkung der Rücklauftemperatur) angeraten.

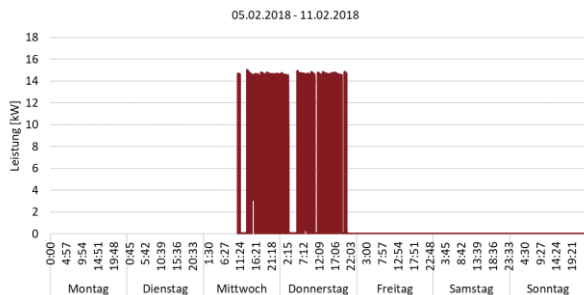
Um die BHKWs flexibel im Sinne einer Day-Ahead oder auch einer Intraday-Optimierung einsetzen zu können, müsste nach einer Simulation des Projektpartners AVAT ein zusätzlicher thermischer Speicher mit dem gleichen Volumen wie bisher vorhanden (36 m<sup>3</sup>) gebaut werden. Nach der Simulation ergeben sich ca. 2% mögliche Mehrerlöse durch den Einsatz als flexible Erzeugungskapazität, die dafür zu tätigen Investitionen sind aber im Verhältnis deutlich zu hoch. Aus diesem Grund wurde der Einsatz der BHKWs als flexible Kapazität nicht weiter verfolgt, sondern eine Empfehlung zur Optimierung des Betriebs ausgesprochen. Sobald der Betrieb der BHKWs den Soll-Werten entspricht, kann der Einsatz als flexible Kapazität erneut bewertet werden.

### 3.6.3.2 Reinigungsanlage für Matrizen

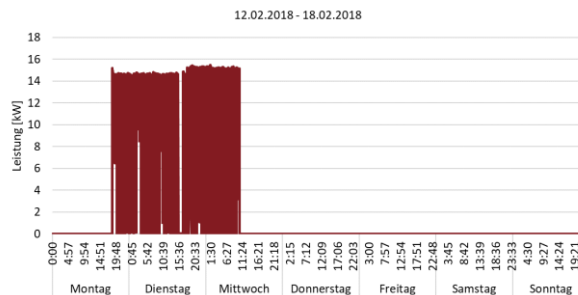
Die Reinigungsanlage lässt sich durch die Möglichkeit der gesamten Prozessverschiebung als flexible Last einsetzen, da der Prozess im Batch-Verfahren betrieben wird. Die Matrizen können in der Anlage gereinigt werden, wenn die Netzsituation günstig ist. Wenn der Prozess gestartet ist, kann dieser jedoch nicht mehr unterbrochen werden, ein Reinigungsdurchlauf dauert ca. 30 Minuten. Lediglich



die Abrufleistung von ca. 15 kW während des Prozesses ist nach den Messdaten relativ gering, die Ergebnisse können auf größere Anlagen übertragen werden.



**Abbildung 8: Messkurve 1 (Matrizenreinigung),**  
Quelle: PATAVO



**Abbildung 9: Messkurve 2 (Matrizenreinigung),**  
Quelle: PATAVO

### 3.7 Zweckverband Abwasserreinigung Balingen (ZA)

#### 3.7.1 Kurzbeschreibung

Der ZA betreibt die Kläranlage sowie einige Pumpstationen im Raum Balingen. Auf dem Gelände der Kläranlage sind neben diversen Lüftern und Pumpen mehrere BHKWs im Einsatz, welche mit selbst-erzeugtem Faulgas oder auch Erdgas aus dem Netz betrieben werden können. Zusätzlich sind eine solare Schlamm-trocknung sowie eine kleine Wasserkraftanlage vorhanden. Die Auswahl der detail-liert untersuchten Anlagen beruht hauptsächlich auf bei der Begehung vor Ort erhobenen Anlagen-daten und Zusammenhängen in den Betriebsabläufen. Umfassende Anlagenlisten (wie bei einer ISO 50001 oder einer Auditierung nach DIN EN 16247-1) lagen nicht vor.

#### 3.7.2 Untersuchte Anlagen

##### 3.7.2.1 Gebläse im Belebungsbecken

Die Belebungsbecken im Klärwerk benötigen große Mengen Luft, um das Wasser mit ausreichend Sauerstoff anzureichern. Hierfür werden insgesamt drei Gebläse eingesetzt. Die normale Grundlast der Luftmenge wird von einem Gebläse erbracht, welches durch einen Frequenzumrichter in seiner Leistung geregelt werden kann. Die anderen beiden Gebläse werden als Redundanz eingesetzt, bzw. zusätzlich bei maximaler Auslastung (abhängig vom Zufluß) des Belebungsbeckens in Betrieb genommen. Diese sind nicht regelbar und daher nicht optimal in den Prozess integriert. Für die mess-technische Detailuntersuchung (Dauer: 1 Woche) wurde das leistungsgeregelte Gebläse 3 (Grundlas-terzeuger) ausgewählt.

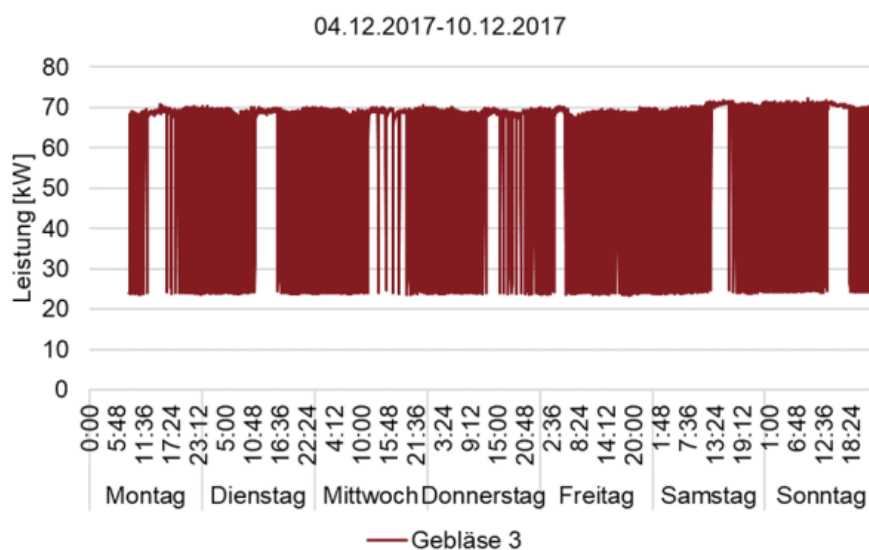


Abbildung 10: Leistungsverlauf Gebläse 3 (FU-gesteuert), Quelle: PATAVO

Die Leistung schwankt häufig zwischen 25 kW und 70 kW, je nach Zufluss zum Belebungsbecken.

### 3.7.2.2 Pumpstation Engstlatt

Das Pumpwerk wurde für eine detailliertere messtechnische Betrachtung über eine Woche ausgewählt, da die dort installierten Anlagen über eine hohe Nennleistung verfügen und im Prozess „Pumpwerk“ ein großer Wasserspeicher integriert ist. Zudem gibt es noch zwei weitere Pumpwerke im Abwassernetz des Klärwerks Balingen. Mit hoher Wahrscheinlichkeit sind die Ergebnisse dieses Pumpwerkes übertragbar auf andere Pumpwerke, da immer vergleichbare Anlagen im Einsatz sind, die Betriebsführung nahezu gleich ist und ähnliche Parameter und Restriktionen den Betrieb beeinflussen.

### 3.7.2.3 Beschickungs- und Umwälzpumpen für Faultürme

Bei der Klärschlammverwertung werden mehrere Pumpen eingesetzt, um den Prozess zu betreiben. Da der Schlammfäulungsprozess der Kläranlage sehr stabil ist und die installierten Pumpen über eine hohe elektrische Leistung verfügen, ist der Prozess für eine Detailuntersuchung geeignet. Es ist anzunehmen, dass der Prozess der Schlammfäulung auf Veränderungen der Betriebsweise der eingesetzten Anlagen träge reagiert und die Auswirkungen auf die Prozessstabilität nur sehr gering sind. Außerdem ist die Klärschlammverwertung nicht direkt mit der Abwasserreinigung gekoppelt und daher unabhängig von Witterungseinflüssen.

### 3.7.2.4 Frischschlammumpen

Die Pumpen im Vorklärbecken ziehen den abgesetzten Frischschlamm ab und befördern diesen in den Voreindicker. Da das Vorklärbecken als Speicher für den Frischschlamm genutzt werden kann, wurden die Pumpen für den Einsatz als Flexibilität untersucht.

### 3.7.2.5 BHKW

Im Klärwerk Balingen wird nicht nur Energie verbraucht, sondern auch ein erheblicher Anteil des Stroms selbst produziert. Eine dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung mit mehreren Blockheizkraftwerken und großen thermischen Speichern eignet sich sehr gut für eine flexible Betriebsweise. Die Ergebnisse können auf andere BHKWs übertragen werden, wobei sich die Flexibilität mit hoher Wahrscheinlichkeit nahezu linear mit der Leistung der Aggregate skalieren lässt. Hauptsächlich wurde das BHKW 5 mit ca. 160 kW<sub>el</sub> installierter Leistung untersucht, da dieses in der Leistung moduliert

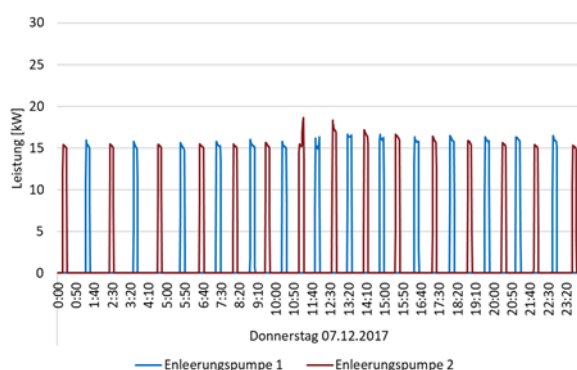
und sowohl mit Faul- als auch mit Erdgas betrieben werden kann. Somit kann auch der Brennstoffspeicher in die Flexibilität mit einbezogen werden.

### 3.7.3 Geeignete Flexibilitäten und andere Ergebnisse

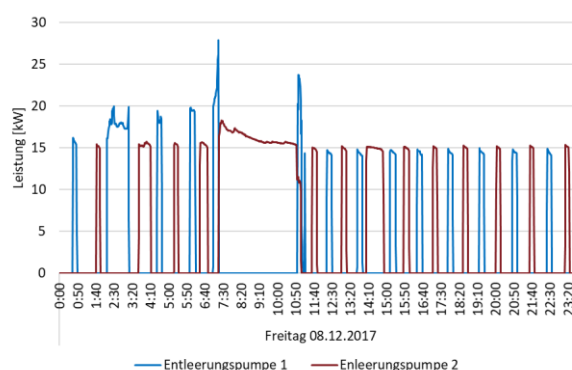
Nachfolgend werden die beim Musterbetrieb detailliert untersuchten Flexibilitäten sowie deren zu erfassende Parameter für die dauerhafte Nutzung als flexible Last dargestellt.

#### 3.7.3.1 Pumpwerk Engstlatt

In Kombination mit einer Veränderung der bisher vorgegebenen Speicherfüllstände können die Pumpen der Station „Engstlatt“ für einen Einsatz als flexible Last genutzt werden. Um Detailinformationen über die aktuelle Betriebsweise zu erhalten, wurde die Leistungsaufnahme der Pumpen über einen längeren Zeitraum mit einem Leistungslogger gemessen. Das Messintervall der einwöchigen Messung wurde dabei auf Ein-Minuten-Werte festgelegt, um eine möglichst hohe Auflösung zu erhalten.

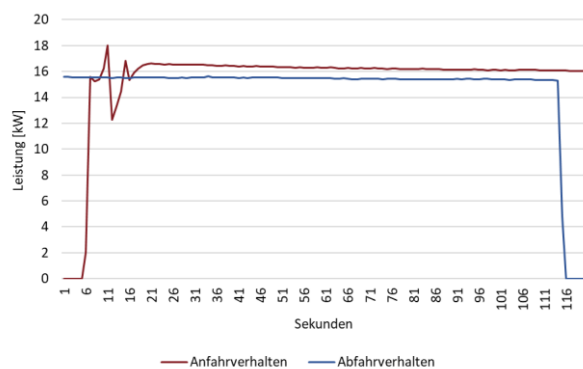


**Abbildung 11:**  
Leistungsverlauf  
Entleerungspumpen  
(7.12.2017), Quelle:  
PATAVO



**Abbildung 12:**  
Leistungsverlauf  
Entleerungspumpen  
(8.12.2017), Quelle:  
PATAVO

Bei normalem Betrieb laufen die Pumpen abwechselnd in einem vorgegebenen Zyklus anhand des Füllstands des Speichers (per Sensor gesteuert). Die Spitzen in der Leistung werden durch Verunreinigungen im Wasser verursacht, welche durch die Pumpe gefördert werden. Die Leistung kann innerhalb kürzester Zeit zur Verfügung gestellt werden, es gibt nur eine sehr geringe Vorlaufdauer von ca. 3 Sekunden für das An- und Abfahren der Pumpen:



**Abbildung 13: An- und Abfahrverhalten der Entleerungspumpen, Quelle: PATAVO**

Die aktuell zu beachtenden Restriktionen sind der Mindestfüllstand von 5% (Pumpenschutz), ein maximaler Füllstand von 21,5%, bei welchem die Pumpen den Speicher entleeren sowie die Tatsache, dass die Pumpen abwechselnd betrieben werden sollen. Um die Pumpen jederzeit als flexible Last nutzen zu können, müsste der untere Füllstand des Speichers angehoben werden. So kann sichergestellt werden, dass immer genug Volumen im Speicher für einen sicheren Betrieb der Pumpen innerhalb eines 15-Minuten-Rasters vorhanden ist. Diese Ergebnisse sind in dieser Form auf weitere Pumpstationen übertragbar. Eine Pumpenstation dieser Größe für sich allein betrachtet hat wenig Auswirkung mit einer flexiblen Betriebsweise. Ein Zusammenschluss mehrerer Pumpstationen in einem Stromnetz aber kann signifikante Auswirkungen für eine Optimierung haben.

### Zu erfassende Parameter

Um die Station als Flexibilität nutzen zu können, muss diese mit einer Witterungsvoraussage ausgestattet werden, welche bei drohendem Regenwetter den Speicher entleert und das Volumen komplett zur Verfügung stellt. Um die Pumpen als flexible Last zu nutzen, muss der minimale Füllstand des Speichers zwischen 5% und 21,5% erhöht werden, so dass mehr Wasser zur Verfügung steht, wenn eine Flexibilitätsanforderung entsteht. Dementsprechend können die Pumpen bei einer Anforderung bis zum neu definierten Mindestpegel arbeiten.

### 3.7.3.2 Gebläse im Belebungsbecken

Auch die Gebläse der Belebungsbecken können unter Beachtung der vorgegebenen Grenzwerte genutzt werden. Da der Prozess relativ träge auf Veränderungen reagiert, kann der  $O_2$ -Gehalt (Zielwert: 1,5 mg  $O_2$ /l als Mittelwert aus allen vier Becken) als Speicherkapazität genutzt werden.

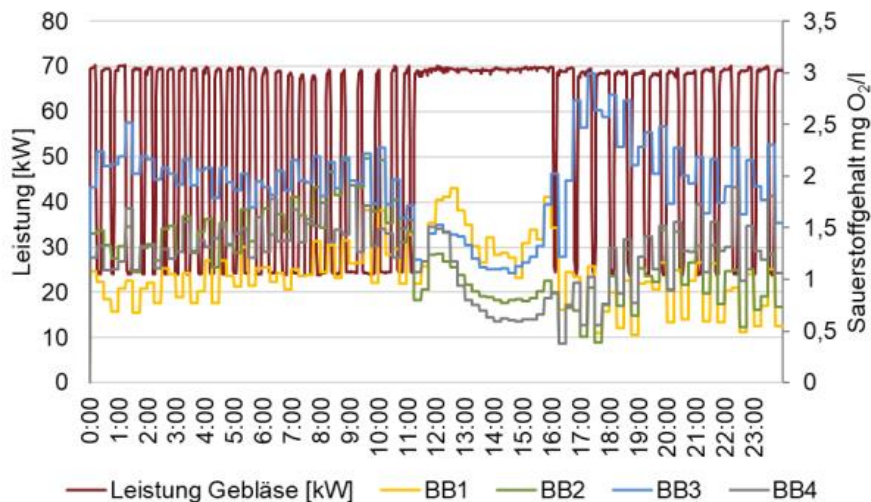


Abbildung 14: Gebläseleistung und Sauerstoffkonzentration, Quelle: PATAVO

Diese Speicherkapazität und die möglichen Abweichungen (nach unten sowie nach oben) vom Zielwert erlauben es, die Gebläse flexibel einzusetzen. Eine Abweichung zum unteren sowie zum oberen Leistungswert ist für ca. 15 Minuten möglich.

### Zu erfassende Parameter

Um die Gebläse dauerhaft als flexible Last zu nutzen, muss der O<sub>2</sub>-Gehalt in den Becken ständig erfasst und überwacht werden. Abhängig von diesen Daten sowie der möglichen Abweichung vom Zielwert der O<sub>2</sub>-Konzentration in den Becken können die Gebläse flexibel betrieben werden. Die Einrichtung zur Erfassung des O<sub>2</sub>-Gehaltes ist bereits am Standort installiert. Diese Daten müssen einer entsprechenden Optimierungssoftware zur Verfügung gestellt werden, welche dann Vorschläge für den Betrieb der Gebläse über einen Tag erstellt.

### 3.7.3.3 BHKW 5

Das BHKW 5 verfügt über eine hohe Leistung von 160 kW<sub>el.</sub>, welche innerhalb von ca. 2-3 Minuten nach einem Start erreicht werden kann. Um das Verhalten der BHKWs im Startfall bewerten zu können, wurde die Erzeugungsleistung mit einem Logger in sekundlicher Auflösung gemessen.

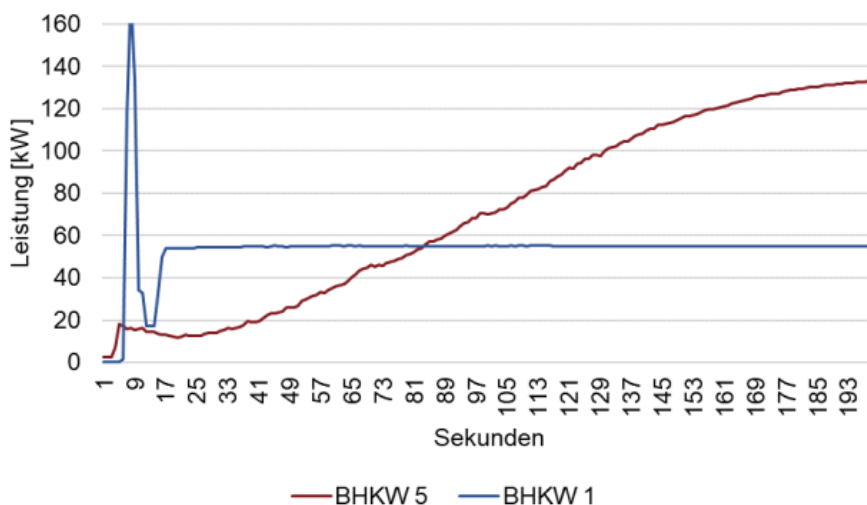


Abbildung 15: Anfahrverhalten BHKW 1 und BHKW 5, Quelle: PATAVO

Die BHKWs versorgen im vorliegenden Fall die Kläranlage mit dem eigenerzeugten Strom. Um die BHKWs flexibel nutzen zu können, muss der Lastbezug der Kläranlage als Speicher für die Flexibilität der BHKWs angesehen werden. Je nach Lastsituation können die BHKWs gesteuert werden. So kann

je nach Netz- oder Strompreissituation mehr oder weniger Leistung aus dem Netz bezogen werden. Dabei zu beachten sind technische Restriktionen der BHKWs (Abnutzung etc.) und auch weitere Parameter, wie z.B. der Wärmebedarf der Belebungsbecken und der Faultürme, welche durch die BHKWs beheizt werden. Da die thermischen Speicherkapazitäten jedoch relativ träge sind und nur langsam Wärme verlieren, ist der Einfluss dieser Speicher auf die flexible Nutzung weniger gewichtig.

### Zu erfassende Parameter

Um die BHKWs flexibel zu betreiben, muss der ständige Leistungsbedarf der Kläranlage bekannt sein. Zudem müssen die Strom- und Wärmeerzeugung der BHKWs sowie die Wärmeabnahme und die Temperatur der Faultürme und der Belebungsbecken ständig erfasst werden. Aus der Differenz der elektrischen Bezugs- und Erzeugungsleistungen unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs der Abnehmer kann jederzeit bestimmt werden, wieviel flexible Leistung (positiv oder negativ) zur Verfügung gestellt werden kann.

## 3.8 Flexibilität bei Produktionsanlagen der Metallbe- und -verarbeitung

Parallel zu den empirischen Untersuchungen in den Musterbetrieben entwickelte die Hochschule Reutlingen Prozessmodelle und untersuchte diese auf ihre Eignung zur Lastverschiebung. Ein ausführlicher Bericht dazu findet sich in Anhang 3.

Bei der Analyse der Produktionsprozesse im Bereich der Metallbe- und -verarbeitung kann die Entscheidung über Flexibilität nach folgendem Schema durchgeführt werden: Dabei wird zunächst unterschieden, ob es sich um einen Serienprozess (kontinuierliche Bearbeitung gleicher Bauteile) oder um einen individuellen Prozess (Bearbeitung unterschiedlicher Bauteile) handelt. Das zweite Kriterium für die Beurteilung ist die Bearbeitungsdauer pro Werkstück/Auftrag. Für einen netzdienlichen Ausgleich sind längere Bearbeitungen (ab ca. 15 Minuten mit entsprechendem Leistungsbedarf) erforderlich. Soll ein Ausgleich der Leistungsaufnahme erfolgen, sind neben unterschiedlichen Leistungsbedarfen auch die Flexibilität in der Reihenfolge der Bearbeitung erforderlich. Eine derartige Reihenfolge- und Lieferterminplanung kann in der Arbeitsvorbereitung mittels ERP durchgeführt werden. Die Flexibilität kann durch Folgeprozesse, sehr lange Bearbeitungsdauern und Maschinenengpässe eingeschränkt werden. Eine Bewertung der Möglichkeiten zur Ausnutzung der Flexibilität erfolgt vor allem auf der Basis der möglichen nutzbaren Leistungsunterschiede (durchschnittliche Leistung über der Zeit) und den damit erzielten Ausgleichseffekten. Die Korrelation der Leistungscharakteristik der möglichen flexiblen Aufträge muss dann auch mit den Marktsignalen des Strommarktes vorhanden sein.

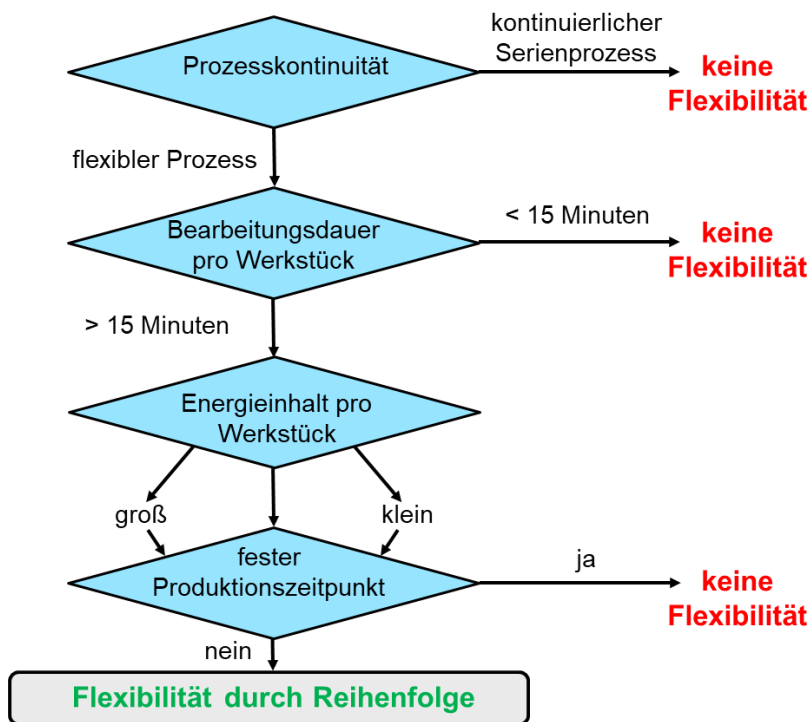


Abbildung 16: Flussdiagramm zum netzdienlichen Einsatz von Produktions-Flexibilität [Quelle: Hochschule Reutlingen]

### 3.9 Fazit der Arbeitspakete 2 & 3

Die entwickelte Methodik zur Identifizierung, Erfassung und Analyse von Flexibilitäten hat sich im Verlauf des Projekts bewährt. Durch die gezielte Abfrage und den Erhalt der Vorabinformationen von den Musterbetrieben konnten die nachgeschalteten Begehungen und (messtechnischen) Untersuchungen von Beginn an auf diejenigen wesentlichen Anlagen und Prozesse konzentriert werden, bei welchen relevantes Potenzial für die Nutzung von Flexibilitäten vermutet wurde. Das Vorgehen nach der in den Arbeitspaketen 2 & 3 beschriebenen Methode ist für die Schaffung einer umfassenden Datenbasis immer zu empfehlen, auch wenn vorab bereits detaillierte Informationen zu spezifischen Anlagen und Prozessen vorliegen.

## 4. Arbeitspaket 4: Geschäftsmodelle für Flexibilität in den Unternehmen

In diesem Arbeitspaket wurden Geschäftsmodelle für die Vermarktung von Flexibilität bei Unternehmen untersucht und ein Leitfaden über geeignete Strommärkte erstellt. Darüber hinaus wurde ein Leitfaden zur Prüfung und Eignung geeigneter Stromverbraucher und Erzeuger bei KMU entwickelt.

### 4.1 Strommarkt

Im Rahmen studentischer Arbeiten wurden die verschiedenen Strommärkte (Regelleistung, Spotmärkte, Direktvermarktung) und Pool-Manager bzw. Aggregatoren auf ihre Tauglichkeit in Bezug auf die Vermarktung von Flexibilität in Unternehmen untersucht [Sutt2018].

#### 4.1.1 Regelleistung

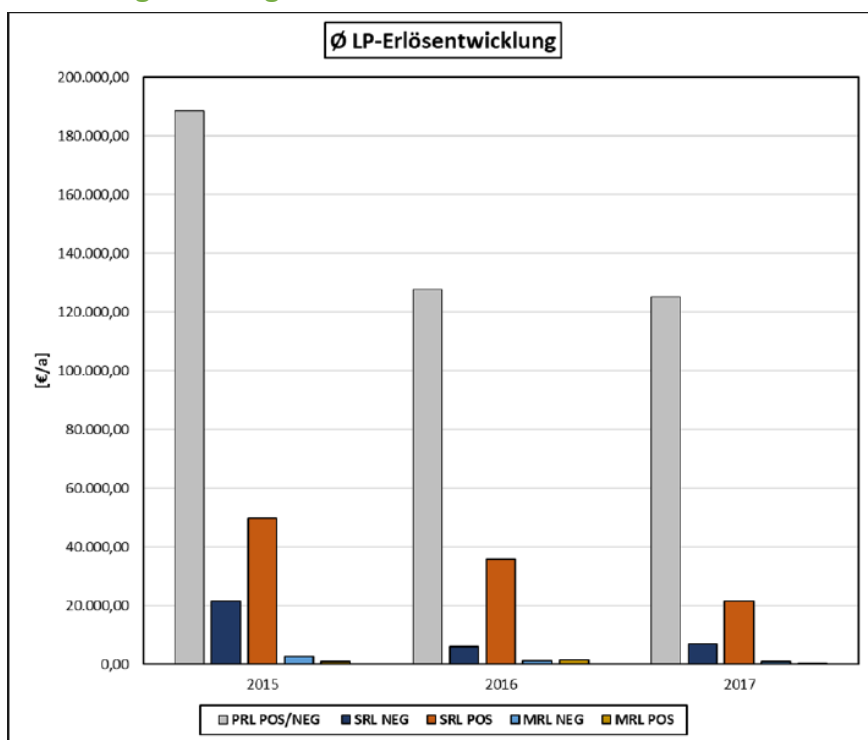


Abbildung 17: Erlösentwicklung Regelleistung-Leistungspreis [Sutt2018]

Es zeigt sich, dass der Regelleistungsmarkt für alle Ausprägungen einem starken Preisverfall unterliegt. Der Markt wird wesentlich von Bestandsanlagen bedient. Neuanlagen werden aufgrund der Investition in Informations- und Kommunikationstechnik kaum noch integriert.



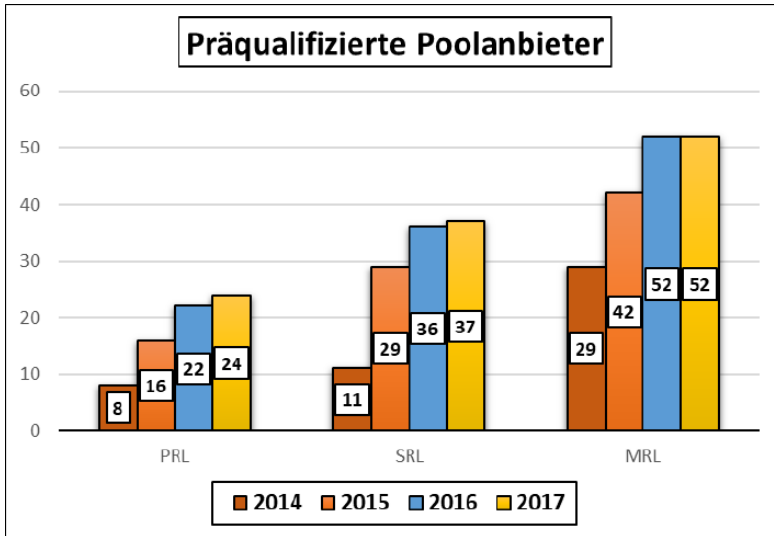


Abbildung 18: Anzahl der präqualifizierten Pool-Manager im Regelleistungsmarkt [Sutt2018]

Auch in der Anzahl der präqualifizierten Pool-Manager zeichnet sich eine Stagnation ab. Vereinzelt haben sich bereits Anbieter vom Regelleistungsmarkt verabschiedet.

- ➔ Aufgrund der nichtplanbaren Regelleistungsabrufe ist dieser Markt nur für hochflexible Strom-Erzeuger und -Verbraucher tauglich und somit für das VK\_Koop-Konzept weniger geeignet
- ➔ Auch wirtschaftlich ist der Regelenergiemarkt derzeit nicht lukrativ

#### 4.1.2 Spotmarkt

Da der Spotmarkt einfacher zu bedienen ist (keine Präqualifikation, vereinfachte Kommunikationseinrichtungen) hat sich in letzter Zeit die Flexibilitätsvermarktung von der Regelenergie in Richtung Spotmarkt verschoben. Abbildung 19 zeigt die Entwicklung Spreads vom Intraday- und Day-Ahead-Preis.

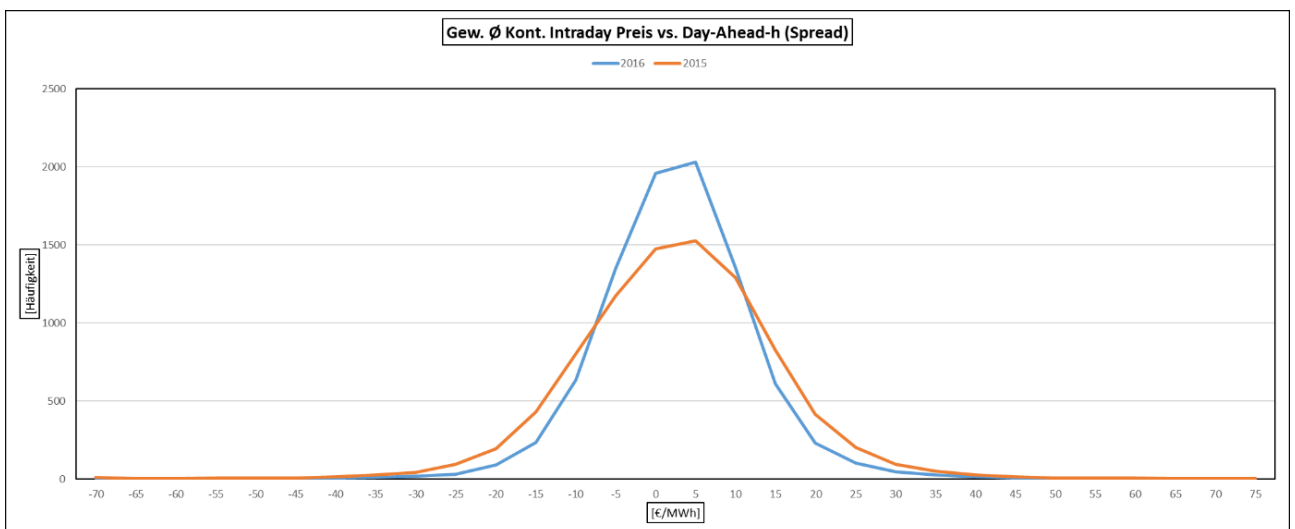


Abbildung 19: Spreadentwicklung Intradaypreis gegen Day-Ahead Stundenpreis [Sutt2018]

Die Preislage hat sich von 2015 auf 2016 etwas verschlechtert, dagegen sieht 2017 wieder besser aus. Es ist damit zu rechnen, dass sich das Angebot vergrößern wird und sich zunehmend der Markt von Regelenergie zu Intraday-Vermarktung verschieben wird. Andererseits wird sich die Volatilität

durch den vermehrten Einsatz von regenerativen Energieerzeugern weiter erhöhen, was sich in einem höheren Spread widerspiegeln wird.

### 4.1.3 Intraday-Markt

Zunehmend wird in der Spotmarkt-Vermarktung neben dem Day-Ahead-Markt auch der Intraday-Markt als Vermarktungsoption für Virtuelle Kraftwerke interessant.

Um den Intraday-Markt für das VK\_Koop-Konzept nutzen zu können ist es notwendig, dass die Preise, zumindest zeitweise, prognostizierbar sind.

Dazu wurden tiefergehende Analysen durchgeführt [Zol2018-1], [Zol2018-2].

### 4.1.4 Intraday-Auktionsmarkt

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt [Zol2018-1]:

- Statistische Untersuchung der Intraday-Auktionspreise.
- Untersuchung des „Sägezahn“-Effektes.
- Korrelation mit Solar- und Windprognosen.

Ergebnisse:

- Es gibt Viertelstunden am Tag, in denen die Wahrscheinlichkeit besonders hoch ist, bei der Intraday-Auktion niedrige bzw. hohe Preise zu erzielen.
  - Die Viertelstunden mit den höchsten bzw. niedrigsten Preisen variieren etwas jahreszeitenabhängig.
  - Zwischen Solar- und Windprognosen und erzielbarem Preis gibt es keine signifikante Korrelation.
  - Zwischen gehandeltem Volumen und Preis besteht eine hohe Korrelation.
- ➔ Regelmäßigkeiten des Intraday-Auktionsmarkts lassen sich bedingt für die Steigerung der Erlöse bei der Flexibilitätsvermarktung einsetzen.

### 4.1.5 Kontinuierlicher Intraday-Markt

Es wurden statistische Untersuchungen des kontinuierlichen Intraday-Marktes sowie die Korrelation mit Solar- und Windprognosen und Lastprognosen durchgeführt [Zol2018-2]. Ergebnisse:

- Es sind lediglich Korrelationen der Preise bezüglich Lastprognosen und Day-Ahead-Preisen erkennbar.
  - Zwischen Solar- und Windprognosen und erzielbarem Preis gibt es keine signifikante Korrelation.
- ➔ Regelmäßigkeiten des kontinuierlichen Intraday-Marktes lassen sich nicht für die Steigerung der Erlöse bei der Flexibilitätsvermarktung nach dem VK\_Koop-Konzept einsetzen. Intraday Vermarktung ist nur für hochflexible Anlagen nutzbar.

## 4.2 Vergleich der Pool-Manager

Über Telefoninterviews wurde eine Marktübersicht dreier möglicher Pool-Manager bzw. Aggregatoren (Next Kraftwerke, Energy2Market, Trianel) durchgeführt [Sutt2018]:

- Vergleich nach Marktanteil, Produkte, Zielgruppen
- Projektbezogene Fragen (z.B. Steuerboxen, Möglichkeit der Voraggregation, Dienstleistungsmodell ...)
- Einschätzung nach Stärken und Schwächen

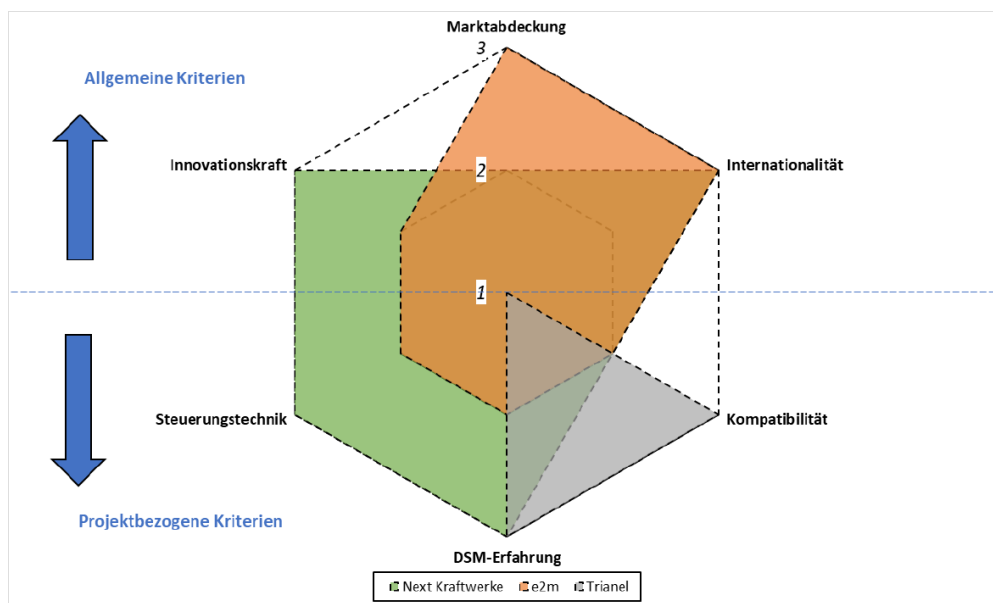


Abbildung 20: Vergleich der Anbieter anhand folgender Kriterien: Innovationskraft, Marktabdeckung, Internationalität, Kompatibilität, DSM Erfahrungen, Steuerungstechnik [Sutt2018]

- Beim Vergleich der Steuerungskonzepte der untersuchten Unternehmen mit dem Ansatz von VK\_Koop ergaben sich deutliche Vorteile gegenüber den gängigen Fernsteuerungs-Mechanismen:Anlagenhoheit bleibt beim Kunden
- Steuerbox enthält Optimierungsalgorithmus (Kunde muss nicht selbst optimieren)
- Daten verbleiben beim Kunden
- Flexibilität kann optimal genutzt werden

### 4.3 Leitfaden für die Auswahl des geeigneten Strommarkts

Es wurden folgende Untersuchungen für die Entwicklung eines Leitfadens durchgeführt:

- Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Eignung der Vermarktungsoptionen für die Musterbetriebe
- Anwendung der Kriterien/ Durchführung der Bewertung
- Erstellung eines Leitfadens

Ergebnis:

Zusammenfassend lässt sich das Ergebnis grafisch in 5 Dimensionen (Kriterien) darstellen (die Unternehmen 1 bis 5 sind die 5 Musterbetriebe des Projekts):

Arbeitspaket 4: Geschäftsmodelle für Flexibilität in den Unternehmen

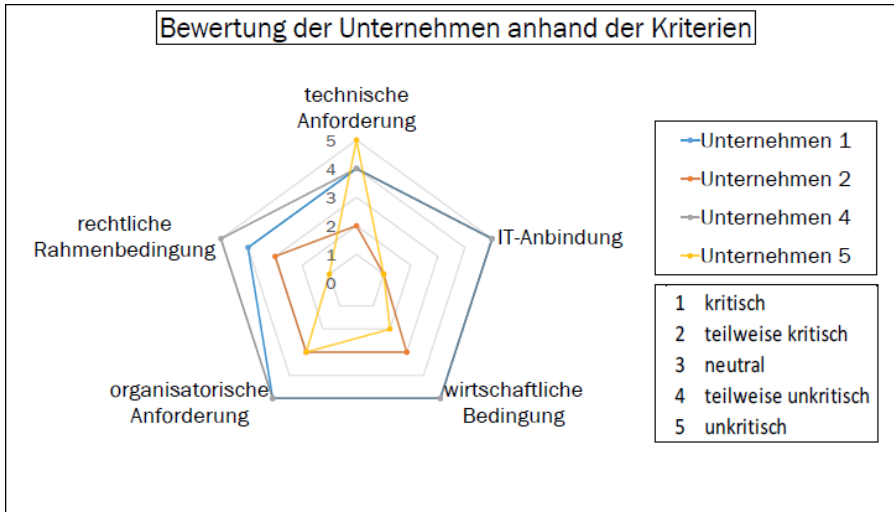


Abbildung 21: Grafische Ergebnisdarstellung nach 5 Kriterien [Varli2018]

Aus den spezifischen Bedingungen und der jeweiligen Vermarktungsformen wurde der folgende Leitfaden entwickelt:

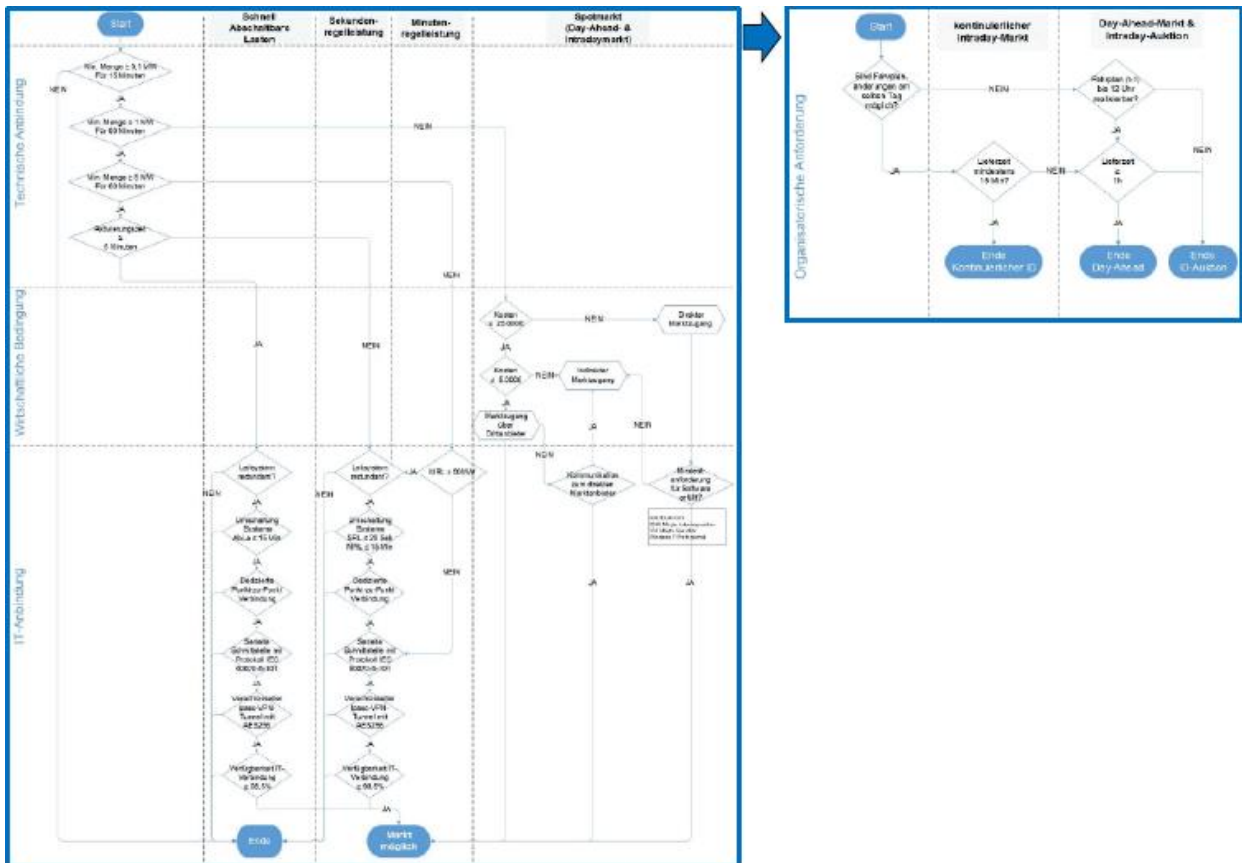


Abbildung 22: Leitfaden zur Auswahl der Vermarktungsmöglichkeiten [Varli2018]

## 4.4 Geschäftsmodelle für Flexibilität in produzierenden Unternehmen

Eine Auswertung von DSM-Studien ergab [Hötz2018], dass nur wenige Studien erstellt worden sind, die sich ausschließlich auf deutsche KMU fokussieren. Bei diesen Studien wurden stark unterschiedliche Auffassungen über das Gesamtpotential in der deutschen Industrie ermittelt, damit ergaben sich unterschiedliche Ergebnisse. Auch die Vorgehensweise zur Ermittlung der Flexibilität differierte bedeutend.

Die Studien beruhen auf geschätzte und hochgerechnete Daten, weniger auf konkrete Projektdaten. Die bereits realisierten branchenspezifischen Projekte erlauben aktuell keine repräsentativen Hochrechnungen.

Tabelle 1: Gegenüberstellung verschiedener DSM-Studien [Hötz2018]

Quelle	Reduktionspotential Dt. gesamt [GW]	Reduktionspotential Dt. Industrie [GW]	Reduktionspotential Dt. Energieint. Industrie [GW]	Lastverschiebung Dt. gesamt für 1 h [GW]	Lastverschiebung Dt. Industrie für 1 h [GW]	Lastverzicht Dt. Industrie [GW]	Kosten Lastverschiebung	Kosten Lastreduktion	Einnahmen aus Stromhandel für Lastreduktion (Dt. Industrie)	Einnahmen aus Reserveenergiemarkt für Lastreduktion (Dt. Industrie)	Kommentare
EWI 2012	12,5-14 (Winterabend)		2,5-3		3,4 (nach 65 h: 0)	1,7 (2,2 nachts)	Effizienzverluste	entgangene Erlöse der Produktion			
r2b 2014	60% der durchschnittlichen Last (konservativ)	10-15 (konservativ)						hohe var. Kosten, geringe Investkosten			zitiert im Grünbuch S. 47, KWK-DSM derzeit nur 500-700 MW, bis 2050: 5,4 GW
Frontier 2014			5-10 (mifri-lafri)				geringe Kosten				zitiert im Grünbuch S. 47
wik-FhG 2006				4,5	2				Min. 1,3-4,3 €/MWh/d	Min. 78 T€/MW/a	
IHK Bayern 2012					2,5		k.A.			Ca. 20 T€/MW/a für Min.res.	Bezug auf FFE 2010
FFE 2010					2,5 (1 GW für 4 h)		System- und Verbraucherkosten				
Agora 2013					1 (in Süddt. BY+BW) davon 0,4 bis 0,45 GW Energieintensive, 0,48 GW Querschnittstechnologien						
dena-Netzstudie II		6,5 (durchschn. pos. DSM); aber nur 1,8 nutzbar	1,8 bzw. 2,1				var. Kosten Chlor: >100 €/MWh; Al bis 1500 €/MWh				
Applied Energy 2011			2,6		660 MW Chlor, 250 MW Papier, 277 MW Alu	314 MW Cement, 1097 MW Steel					CA: Lastverschiebung für bis zu 40% für bis zu 2 h
BET 2015			3,5 (soziotechn.) bis 6 (technisch)				0-100 €/MWh	0-500 €/MWh			aktuell überwiegend nur Lastverschiebung

Aufbauend darauf wurden mögliche Geschäftsmodelle für unterschiedliche Vermarktungsformen herausgearbeitet. Für Regelenergievermarktung kamen keine Prozesse der beteiligten Musterbetriebe in Frage (Ausnahme: Dieselstromaggregate). Hauptgrund ist die geringe Planbarkeit der Abnahme, was für die meisten Industrieprozesse zwingend nötig ist.

Durch die überwiegend geringen Verbrauchsmengen sind auch bei hoher Flexibilität kaum finanzielle Anreize für die untersuchten Musterbetriebe vorhanden.

Erlösberechnungen wurden für die wirtschaftlich interessanten Aggregate Zementmühlen und BHKW für die Flexibilitätsvermarktung durchgeführt.

Es wurde eine Zusammenstellung der Voraussetzungen bezüglich erforderlicher Kompetenzen, Strukturen, Ressourcen und Prozesse bei den KMU vorgenommen. Außerdem wurden die Kostenfaktoren und Rahmenbedingungen untersucht.

Abgerundet wurde die Untersuchung mit einer Zusammenstellung relevanter Faktoren bei der Vertragsgestaltung bezüglich Pflichten, Zahlungsmodalitäten, Haftung etc. Abschließend wurde ein Leitfaden zur Prüfung und Eignung geeigneter Stromverbraucher und Erzeuger bei KMU entwickelt (s. Anhang 4).

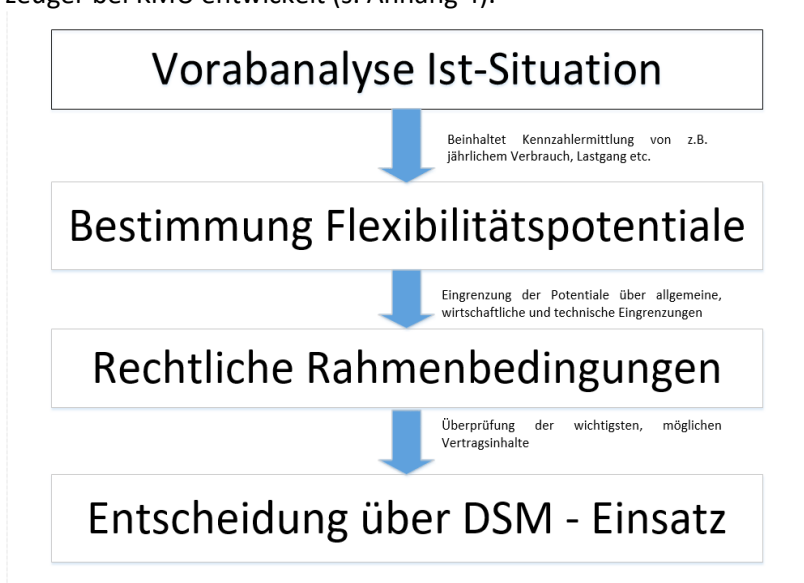


Abbildung 23: Auflistung der wesentlichen Schritte zur Prüfung der Eignung von ausgewählten Industrielasten für den Einsatz von DSM in einem Virtuellen Kraftwerk [Hötz2018]

## 4.5 Workshops mit Musterbetrieben

Aufbauend auf die Ergebnisse von AP 2 und AP 3 wurden Workshops mit den beteiligten Unternehmen durchgeführt. Dabei wurden Möglichkeiten eruiert, welche der technisch möglichen flexiblen Prozesse wirtschaftlich und organisatorisch sinnvoll in ein VK eingebunden werden können. Die Ergebnisse im Einzelnen für die beteiligten Unternehmen:

### 4.5.1 Holcim (Süddeutschland) GmbH



Ölschieferrundlager:

- 10.000 t Kapazität
- Reicht für etwa 6 Tage



Mehrere Zementmühlen

- Ca. 5 MW elektrische Leistung

Drehrohrofen:

- ca. 0,7 MW elektrische Leistung

Rohmehlmühle:

- ca. 1,5 MW elektrische Leistung

Abbildung 24: Beispielzahlen eines Zementwerkes, Quelle: Aufnahme AVAT

### Technisches Potential

Wie bereits in AP 2 dargestellt wird, sind im Wesentlichen die Zementmühlen für einen flexiblen Betrieb geeignet.

Bis auf die Dieselaggregate lässt sich kein einzelner Prozess aus der Gesamtanlage separieren. Der wesentliche Produktionsprozess muss als Ganzes betrachtet werden und kann nur so sinnvoll in ein VK eingebunden werden. D.h. das Prozessmodell muss den gesamten Produktionsablauf beinhalten. Dieser Produktionsprozess ist auf den ersten Blick relativ komplex mit vielen Abhängigkeiten und speziellen Randbedingungen der Zementindustrie (z.B. verschiedene Zementsorten mit spezifischen Leistungen und Laufzeiten der Mühlen, Mindestlaufzeiten, parallele Speicher usw.) und stellte an AP 5 eine große Herausforderung dar. Im Laufe des Projekts wurden jedoch im Vergleich mit Prozessen der anderen Musterbetriebe sowie Erfahrungen aus dem Bereich der Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen Gemeinsamkeiten herausgearbeitet, die einen generellen Ansatz zuließen.

### Wirtschaftliches Potential

Die Produktionsanlage ist hochgradig automatisiert und vernetzt, so dass mit der Integration in ein VK keine großen Aufwände bezüglich Verkabelung und Vernetzung getroffen werden müssen.

### Praktisches, organisatorisches Potential

Der Betrieb des Werkes läuft rund um die Uhr, 7 Tage die Woche. D.h. seitens des Betreiberpersonals kann die Anlage ohne Mehrkosten flexibel gefahren werden. Für den Betrieb der Zementmühlen wird vom Produktionsplaner wöchentlich vorab ein Plan generiert, wonach die Anlage dann vom Betreiberpersonal gefahren wird. Zukünftig soll in diesem Plan die strompreisorientierte Fahrweise berücksichtigt werden. Da dieser Plan von der Steuerbox-Software vollautomatisch generiert wird (s. Kapitel 5.3.4), kann die Integration in ein VK somit ohne großen personellen Mehraufwand realisiert werden.

Konkret konnte eine Hardware mit dem im Kooperationsprojekt „Steuerbox“ entwickelten Algorithmus in das Werk installiert und mit Messwert -und Statussignalen der Anlage verknüpft werden. Dank zahlreichen Hinweisen der Produktionsplanung des Werkes konnte der Produktionsprozess modelliert und damit für die Flexibilitätsvermarktung in einem VK ertüchtigt werden.

## 4.5.2 Mayer & Cie. GmbH & Co. KG

### Technisches Potential

Technisch mögliches Potential liegt im Bereich der Öfen und Waschanlage sowie der Anlagen für Kälte, Lüftung und Heizung.

### Wirtschaftliches Potential

Wirtschaftlich ist mangels einer Vernetzung von Öfen und Waschanlage eine automatische Flexibilitätsvermarktung schwer darstellbar, eine manuelle dagegen könnte mit überschaubarem organisatorischem und personellem Aufwand realisiert werden. Hingegen sind die Bereiche Kälte, Lüftung und Heizung bereits über ein Lastmanagement vernetzt, so dass hier mit relativ geringer Investition ein automatischer Betrieb realisiert werden könnte. Die Erweiterung des Lastmanagements um eine entsprechende Schnittstelle wurde bei einer Drittfirma angefragt. Konkret ausgeführt wurde die Schnittstelle im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch nicht.

### **Praktisches, organisatorisches Potential**

Die manuelle Bedienung der Öfen und der Waschanlage könnte zukünftig nach einem Plan erfolgen, worin die strompreisorientierte Fahrweise berücksichtigt wird. Dieser Plan könnte von einer entsprechenden Software (s. Kapitel 5) automatisiert erstellt werden.

Für die Querschnittstechnologien im Bereich Kälte, Lüftung und Heizung wären die Eingriffe in die Organisation durch den bereits bestehenden vollautomatischen Betrieb relativ gering.

#### **4.5.3 Kocher + Beck GmbH & Co. KG**

### **Technisches Potential**

Technisch mögliches Potential ist im Bereich der Galvanik, Härteöfen und im Bereich der Kälteerzeugung vorhanden. Die einzelnen betrachteten Prozesse sind voneinander weitgehend entkoppelt. Entfettungsanlage und BHKW sind aufgrund der geringen elektrischen Anschlussleistungen weniger geeignet.

### **Wirtschaftliches Potential**

Für eine wirtschaftliche Betrachtung sind weitergehende Untersuchungen sinnvoll. Da die Anlagen kommunikationstechnisch nicht miteinander vernetzt sind und über verschiedene Niederspannungsverteilungen gespeist werden, ist bezüglich Vernetzung mit einem gewissen Aufwand zu rechnen. Zudem sind die Leistungen der Härteöfen relativ gering, so dass hier nur geringe Erlöse zu erwarten sind. Wirtschaftlichen Sinn macht die Flexibilitätsvermarktung, wenn diese mit anderen Maßnahmen verknüpft werden können. Das könnte z.B. die Einführung eines Energiemanagementsystems mit Online-Leistungsmessung, die Verknüpfung mit einem Monitoring- oder Peak-Shaving-System sein.

### **Praktisches, organisatorisches Potential**

Organisatorisch sind die Produktionszeiten der Galvanikanlage monatelang im Voraus bekannt und können so in gewissen Grenzen veränderten Strompreisen angepasst werden. Das gleiche gilt für die Härteöfen. Allerdings werden diese Anlagen bislang im 1-Schicht-Betrieb gefahren. Größere zeitliche Verschiebungen würde zu erhöhtem Personal- und Organisationsaufwand führen.

Die Kälte ist zur Kühlung der Raumluft für Produktionsanlagen (vor allem CNC-Maschinen) notwendig. Die Produktionszeiten sind fix. Damit ist auch der Kältebedarf zeitlich fixiert. Durch Nutzung des Kältespeichers könnten (vor allem wenn die Produktion nicht voll auslastet ist) die Kälteaggregate in der Planung für die Flexibilitätsvermarktung berücksichtigt werden.

#### **4.5.4 Franz Tress GmbH & Co. KG**

### **Technisches Potential**

Bereits in den Untersuchungen zu AP 2 hat sich herausgestellt, dass sich die betrachteten Prozesse technisch nicht, bzw. noch nicht für die Integration in ein VK eignen (s. Ergebnisse dort). Auf eine tiefergehende Analyse wurde daher verzichtet.

#### **4.5.5 Zweckverband Abwasserreinigung Balingen**

Näher untersucht wurden drei Prozesse auf der Kläranlage Balingen: BHKW, Gebläse der Belebungsbecken, Entleerungspumpen der Pumpwerke.

### **Technisches Potential**

Die drei Prozesse sind technologisch voneinander unabhängig und können so getrennt voneinander optimiert betrieben werden.



Durch wahlweisen Betrieb von Faulgas und Erdgas, durch alternative Wärmeerzeugung über Kessel und durch den großen Wärmespeicher im Faulturm weisen die BHKW eine hohe Flexibilität auf.

Durch einen, in Grenzen, variablen Sauerstoffgehalt der Belebungsbecken lässt sich der Betrieb der Gebläse zeitlich flexibel gestalten. Das Belebungsbecken stellt somit einen großen Speicher dar. Damit weisen auch die Gebläse eine hohe Flexibilität auf.

Aufgrund der stark niederschlagsabhängigen Betriebsweise der Entleerungspumpen sowie der relativ geringen Leistungen weisen diese ein begrenztes Potential auf. Erst durch die gemeinsame Betrachtung vieler Pumpwerke in Zusammenhang mit einer Niederschlagsprognose könnte eine signifikante Größe zusammenkommen.

### Praktisches, organisatorisches Potential

Organisatorisch ist mit keinen größeren Aufwänden zu rechnen, da die Anlagen bereits jetzt vollautomatisch betrieben werden. Personenseitig würde die Integration in ein VK keine großen Umstellungen bedeuten.

### Wirtschaftliches Potential

Aufgrund der Leistungswerte und der Flexibilität ist die Optimierung der BHKW von den untersuchten Prozessen am wirtschaftlichsten. Gemeinsam mit einer Niederschlagsprognose kann auch der optimierte Betrieb der Entleerungspumpen wirtschaftlich sein.

Eine konkrete Einbindung des unter Kapitel 5.2 dargestellten Verfahrens in die bestehende Technik der Kläranlage wurde untersucht. Im Rahmen des Förderprojekts konnte die Integration nicht umgesetzt werden: Die bestehende Automatisierungstechnik wurde von verschiedenen Firmen installiert und Schnittstellen hätten zu unterschiedlichen Systemen realisiert werden müssen. Dieses war insbesondere aus Gewährleistungsgründen im Rahmen des Forschungsprojektes nicht darstellbar. Im Anschluss an das Förderprojekt sind bezüglich Optimierung der BHKW weitere Schritte geplant.

#### 4.5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

- Bei einem Musterbetrieb konnte konkret ein Prototyp der entwickelten Steuerbox installiert, mit der Anlagentechnik verknüpft und für die Integration in ein Virtuelles Kraftwerk vorbereitet werden. Bei 2 weiteren Musterbetrieben zeigte sich, dass bei relativ geringem Vernetzungsgrad der Anlagenteile oder vorhandenen heterogenen Systemen, die Umsetzung im Rahmen eines Förderprojektes nicht zu realisieren war.
- Die Anschlussleistungen vieler untersuchter Anlagen und Prozesse in den Musterbetrieben sind relativ gering (< 50 KW). Die momentan für die Flexibilitätsvermarktung in Frage kommenden Märkte (s. Kap. 4.1) sind hierfür nicht wirtschaftlich. Da mit dem gewählten Verfahren (s. Kap. 5.2.1) jedoch eine CO<sub>2</sub> Reduzierung bewirkt wird und ein entsprechender Markt zunehmend an Bedeutung gewinnen wird, ist hier zukünftig mit einer besseren Wirtschaftlichkeit zu rechnen.
- Der Aufwand für die Integration der Steuerbox in ein Unternehmen verringert bzw. verteilt sich, falls gleichzeitig andere sinnvolle Maßnahmen getroffen werden, welche ebenfalls die Vernetzung der Anlagen voraussetzen. Dies könnten Maßnahmen zum automatisierten Energiemanagement nach ISO 50001 oder ein Lastmanagementsystem zur Spitzenlastkapung sein.

## 5. Arbeitspaket 5: Design einer Kommunikationsplattform

Die Aufgabenstellung des AP bestand darin, den Service für die Betriebe und den Prozess des Aushandelns in einer Multiagenten-Architektur zu entwerfen und einen Steuerbox-Prototyp zu testen. Die Steuerbox hat die Aufgabe, unter Ausnutzung der Flexibilität, für Prozesse und Anlagen einen optimierten Fahrplan zu erstellen. Dieser Vorgang erfolgt weitgehend automatisch; die dafür notwendigen Algorithmen wurde im parallel laufenden Projekt „Virtuelle Kraftwerke – Regelarchitektur“ entwickelt [Heim2019], [Heim2018a], [Heim2018b], [Heim2018c], [Stue2019].

### 5.1 Anforderungen von Industrieunternehmen und Stromwirtschaft

Die Anforderungen an die Integration in ein Virtuelles Kraftwerk unterscheiden sich zwischen Industrieunternehmen und Stromwirtschaft z.T. erheblich.

#### Anforderungen des Industrieunternehmens

- Volle Kontrolle über die Prozesse
- Produktionsziel im Vordergrund
- Berücksichtigung der Gesamtkosten
- Einbeziehung der Produktionsplanung
- Minimale Personalbindung
- Niedrige Systemkosten
- Hoher Datenschutz
- Sichere Kommunikation



#### Anforderungen der Energiewirtschaft

- Maximierung der „Handelsmasse“
- Netzstabilität
- Gesamtoptimierung über Bilanzkreis
- Möglichst keine Einschränkung im Abruf
- Vollautomatisierter Betrieb
- Hoher Datenschutz
- Sichere Kommunikation

Abbildung 25: Anforderungen von Industrieunternehmen und Elektrizitätswirtschaft, Quelle: AVAT

Ziel einer VK-Architektur ist es, mit der Flexibilitätsvermarktung die Belange der Industrie mit akzeptablen Kompromissen zu berücksichtigen, um für Industrie und Elektrizitätswirtschaft Gewinne zu erzielen und gleichzeitig die Ziele der Energiewende zu verfolgen. Die Elektrizitätswirtschaft wird in diesem Fall von einem Pool-Manager vertreten, dessen Aufgabe es ist, möglichst viele Teilnehmer an das Virtuelle Kraftwerk anzubinden und diese, resultierend aus der aggregierten Masse, unter Elektrizitätswirtschaftlichen Gesichtspunkten durch den Aggregator optimieren und vermarkten zu lassen (s. Kapitel 6.1).

## 5.2 Architektur des Virtuellen Kraftwerks

### 5.2.1 Vermarktung am Spotmarkt – Prinzip

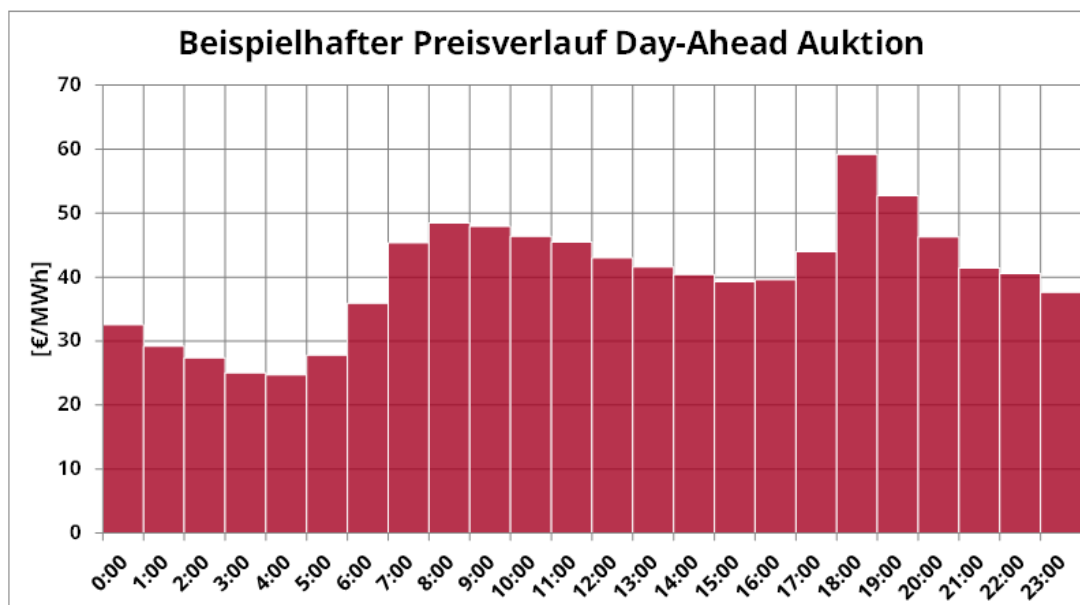
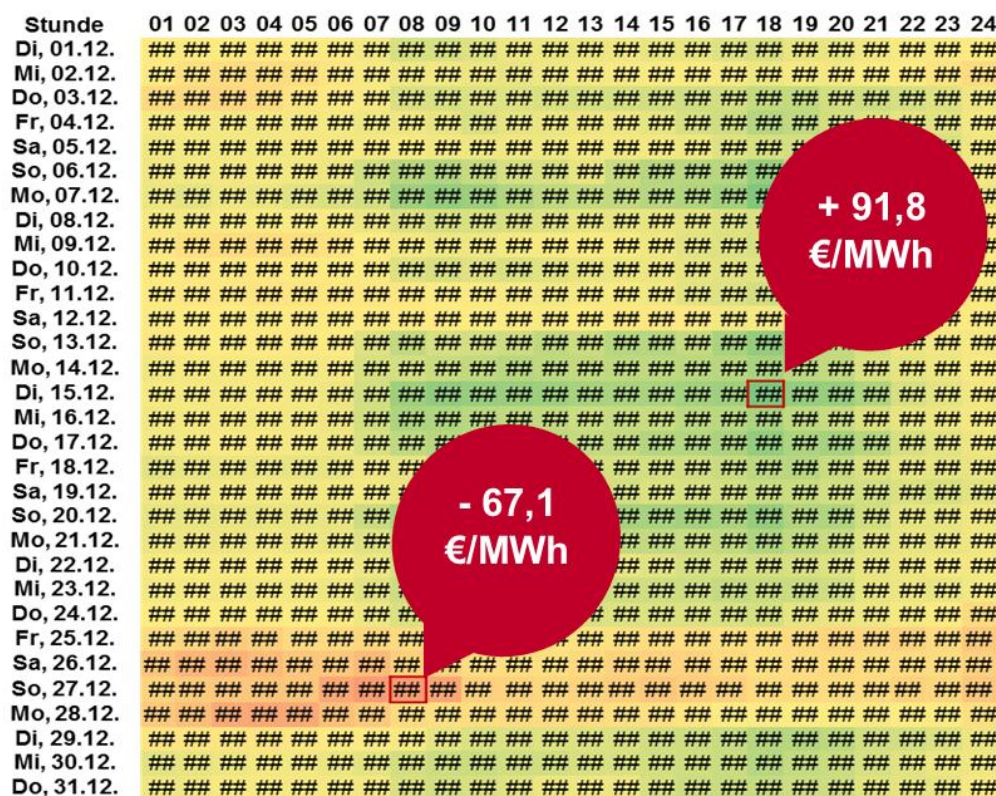


Abbildung 26: Tagesverlauf Day-Ahead-Auktion, Quelle: AVAT

Die Börsenstrompreis-Prognose spiegelt die Angebots- und Nachfrage-Situation im Netz wider. Auf Grund der Merit-Order bedeutet dies: Je mehr regenerative Erzeuger am Netz sind, desto niedriger ist der Börsenpreis. Die Börsenpreisprognose kann als Indikator für die zukünftige regenerative Einspeisung verwendet werden. Somit wird durch eine Verschiebung der Lasten in Niedrigpreisregionen und eine Verschiebung der Erzeugung in Hochpreisregionen eine netzdienliche Fahrweise erreicht, bei gleichzeitiger Erlössteigerung der am VK beteiligter Unternehmen. Durch Ausnutzung der Anlagen-Flexibilität wird der Strom-Bezug genauso wie die Strom-Einspeisung in „lukrative“ Zeiten verschoben. Zusätzlich wird durch diese Verschiebung und der damit einhergehenden vermehrten Nutzung regenerativ erzeugter Energie eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung erreicht.



+ 91,8  
€/MWh

- 67,1  
€/MWh

Abbildung 27: Heatmap Börsenpreis Day-Ahead-Auktion Dez. 2016, Quelle: AVAT

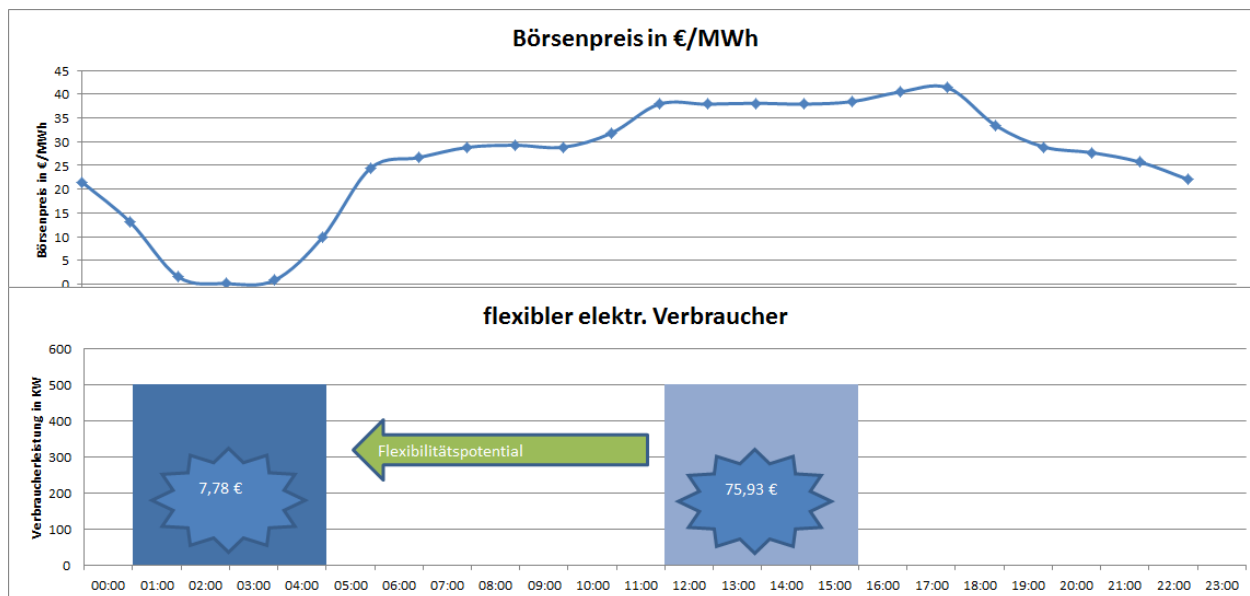


Abbildung 28: Verschiebungspotential und Erlöse an einem Januartag, vereinfachte Darstellung, Quelle: AVAT

Im Beispiel nach Abbildung 28 ergibt sich an einem Januartag durch Verschiebung eines 4-Stunden 500 kW-Blocks von den Nachmittagsstunden in die Nachtstunden eine Reduzierung der Stromkosten um 68,15 EUR. Gegenüber dem Baseload-Durchschnittswert über die letzten sechs Quartale von 42,7 EUR/MWh ergäbe sich eine Reduzierung um 77,62 EUR.

## 5.2.2 Aufbau und gewähltes Verfahren

Es wurde folgende, auf dezentrale Intelligenz geprägte Architektur gewählt, um die zum Teil konträren Anforderungen von elektrizitätswirtschaftlich geprägten Pool-Managern und Betrieben (s. Kapitel 5.1) für beide Seiten akzeptabel umzusetzen:

### VK: Aggregation und Leitebene

- Aggregation, globales Optimum, Vermarktung
- P2P-Handel, Regionaler Energiemarkt, Netzdienlich

### Steuerbox: Betriebsoptimierung

#### KI-gestützter Algorithmus zur Ermittlung optimaler Anlagen-Betriebszeiten am Energiemarkt

- Wetter- und Börsenpreis-Prognosen Strom & Gas
- Lastprognosen (3 Tage)
- Füllgrad und Kosten von Speichern bzw. Lagern der Produktionsanlagen
- Betriebskosten und Wartungskosten
- Energiebezugs-Verträge
- Aggregateauswahl (Merit-Order bzgl. Wärme-Gestehungskosten)

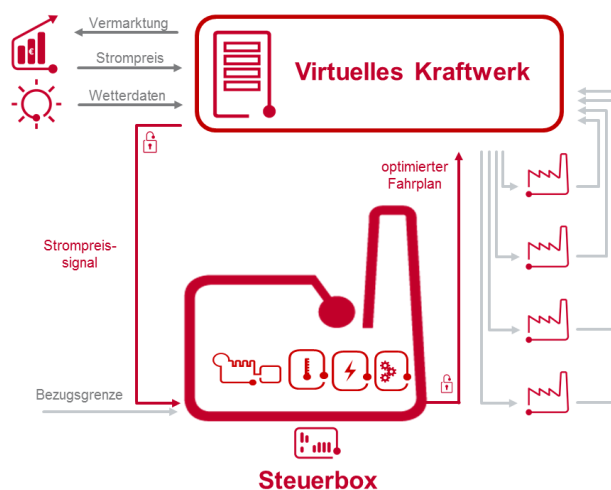


Abbildung 29: Architektur des Virtuellen Kraftwerks mit einem Aggregator, der mehrere Betriebe (Steuerboxen) vermarktet, Quelle: AVAT

Für das VK wurde ein zweistufiger Aufbau gewählt:

- In den Industrieunternehmen ist jeweils eine Steuerbox installiert, welche dezentral gesamt-kostenoptimierte Fahrpläne für die Prozesse und Anlagen erzeugt
- Das Ensemble der Steuerboxen wird über die Aggregations- bzw. Leitebene an den Strommarkt angebunden

Die Kommunikation zwischen den Ebenen erfolgt in einem iterativen Aushandeln, bis beide Ebenen ein für sie befriedigendes Ergebnis erreicht haben:

- **Zentral** werden Prognosedaten des Folgetages für Wetter, Strom- und Gaspreise bezogen und daraus Preissignale für die Unternehmen generiert.
- **Auf Unternehmensebene** wird auf Basis der empfangenen Preissignale die Betriebsführung optimiert. Das Ziel sind minimale **Gesamtkosten**. Dabei werden alle unternehmensspezifischen Randbedingungen berücksichtigt.
- **Flexibilität** von **Erzeugern, Verbrauchern** sowie von **Produktionsanlagen** werden **genutzt** und **Strom-, Wärme- und Prozessspeicher** integriert.
- Das Ergebnis der **dezentralen Optimierung** wird dem **Betriebspersonal** als Fahrplanvorschlag unterbreitet.
- Die **Anlagenhoheit** bleibt generell und jederzeit **im Unternehmen**.
- Dies gilt ebenso für sensible Unternehmens-Daten.
- Ein akzeptierter Fahrplanvorschlag wird zur **Aggregationsebene übertragen**.
- Dort erfolgt gegebenenfalls eine **übergeordnete Optimierung des VK-Pools**, um z.B. Bilanzkreis-Treue zu gewährleisten.
- Daraus abgeleitet sendet der Pool-Manager ggf. ein **verändertes Preissignal** an die Steuerboxen, welche erneut optimieren und einen abgewandelten Fahrplan erstellen.
- Nachdem sich beide Seiten auf einen **Soll-Fahrplan** geeinigt haben, werden die **einzelnen Prozesse nach diesem angesteuert**

## Arbeitspaket 5: Design einer Kommunikationsplattform

- In der **Aggregationsebene erfolgt die Vermarktung** über die Strombörse im Day-Ahead Markt.

Die Steuerbox übernimmt in dieser Struktur folgende Aufgaben:

- Schnittstelle zur Anlage: Verarbeitung der Messdaten, Ausgabe der Fahrpläne
- Schnittstelle für Wetter- und Energiepreisprognosen
- Bedienoberfläche zur Modellierung, Monitoring, Parametrierung und Produktionsplanung der Anlage
- Vollautomatische Generierung gesamtkostenoptimierter Fahrpläne

## 5.3 Der Prozessablauf und die Modellierung am Beispiel eines Zementwerks

Folgendes Schema beschreibt den prinzipiellen Ablauf der Optimierung:

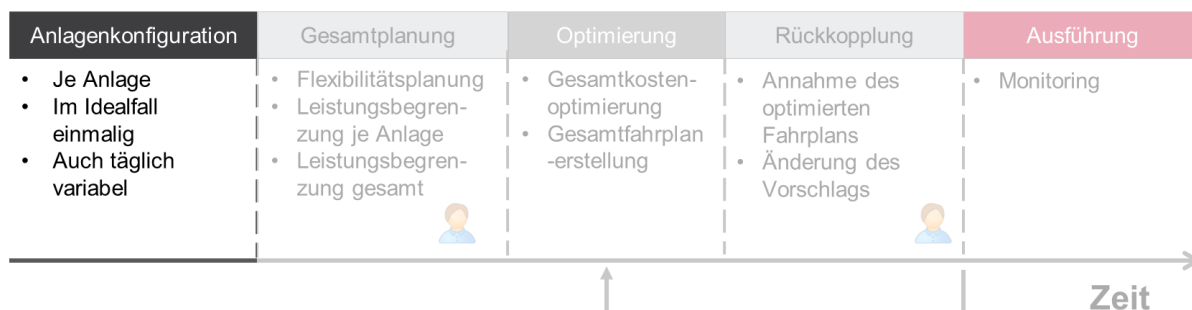


Abbildung 30: Ablauf der Optimierung, Quelle: AVAT

Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

### 5.3.1 Anlagenkonfiguration

In einem ersten Schritt wird die Anlagenkonfiguration, d.h. die Modellierung des Prozesses durchgeführt. Abbildung 31 zeigt den realen Prozessablauf des betrachteten Zementwerks:

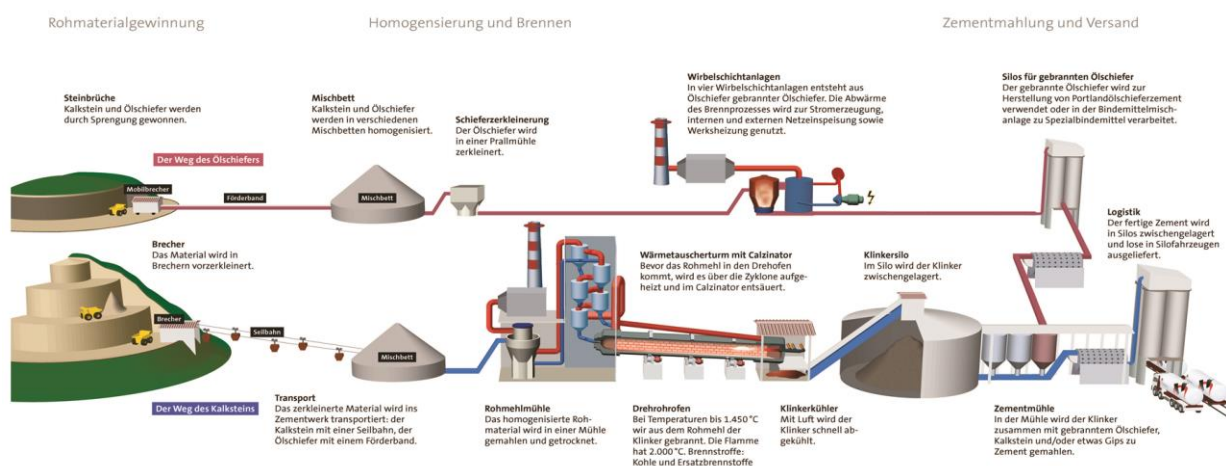


Abbildung 31: Realer Prozessablauf des Zementwerks, Quelle: Holcim (Süddeutschland) GmbH

Daraus erfolgt die Abstraktion des Prozesses auf Erzeuger, Verbraucher und Speicher. Hier ein Beispiel einer Produktionslinie:

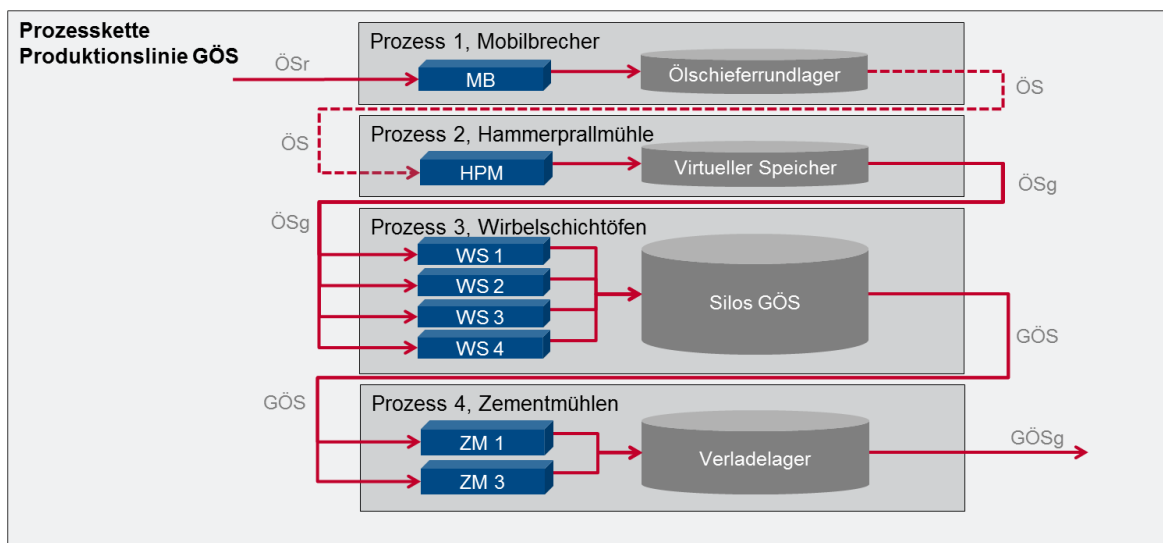


Abbildung 32: Abstraktion des Prozesses, Quelle: AVAT

Daraus entsteht dann das konkrete Modell in der grafischen Oberfläche der Steuerbox:

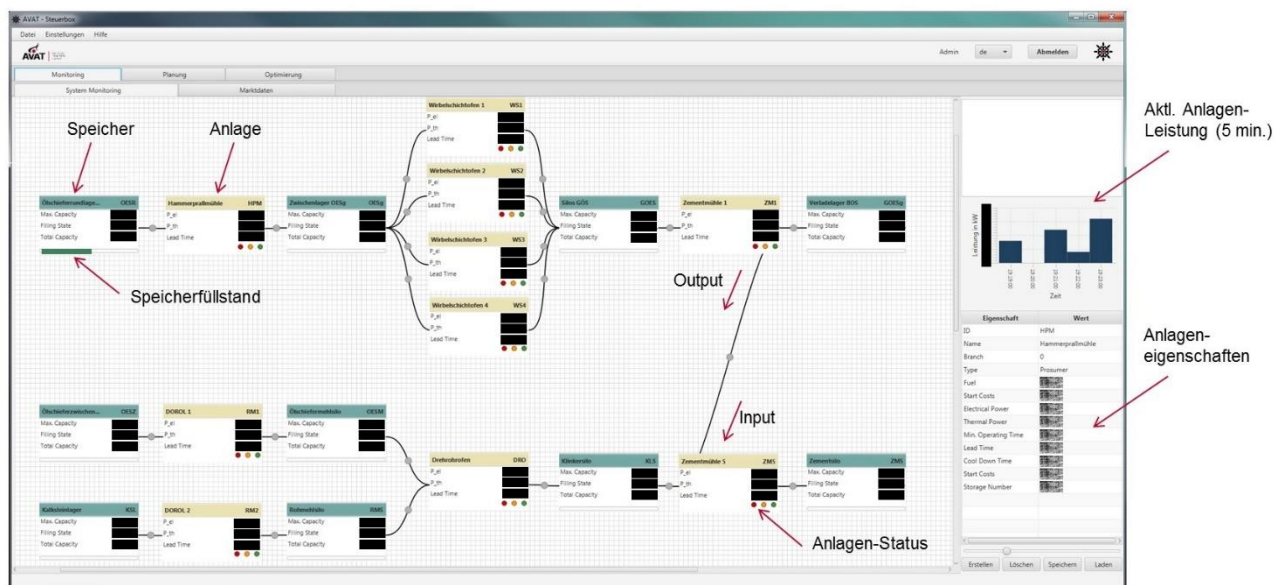


Abbildung 33: Modellierung in Software, Quelle: AVAT

Diese Modellierung erfolgt in der Regel einmalig, kann aber bei veränderten Anlagegegebenheiten und Randbedingungen angepasst werden.

### 5.3.2 Gesamtplanung

In einem zweiten Schritt kann der Produktionsplaner Vorgaben für die Laufzeiten der Aggregate für den Optimierungszeitraum definieren:

## Arbeitspaket 5: Design einer Kommunikationsplattform

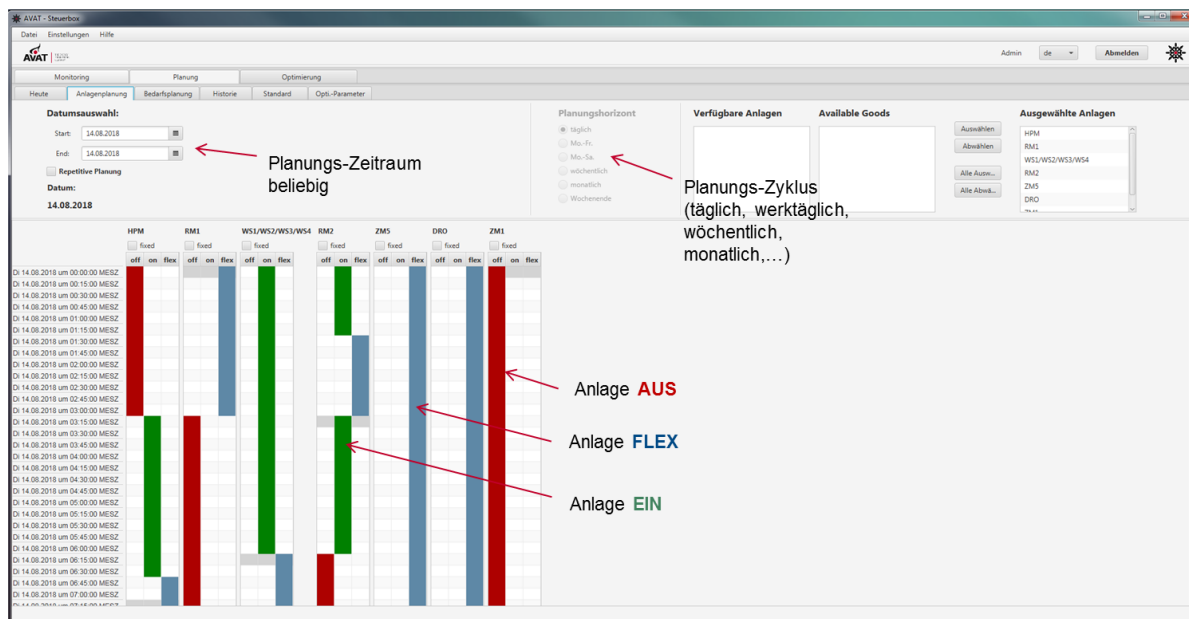


Abbildung 34: Vorgaben für die Laufzeiten, Quelle: AVAT

Hier können z.B. Revisionszeiten, geplante Betriebszeiten und Pausenzeiten eingestellt werden. Ebenso werden in diesem Schritt die geplanten Produktionsmengen dem Optimierer mitgeteilt:

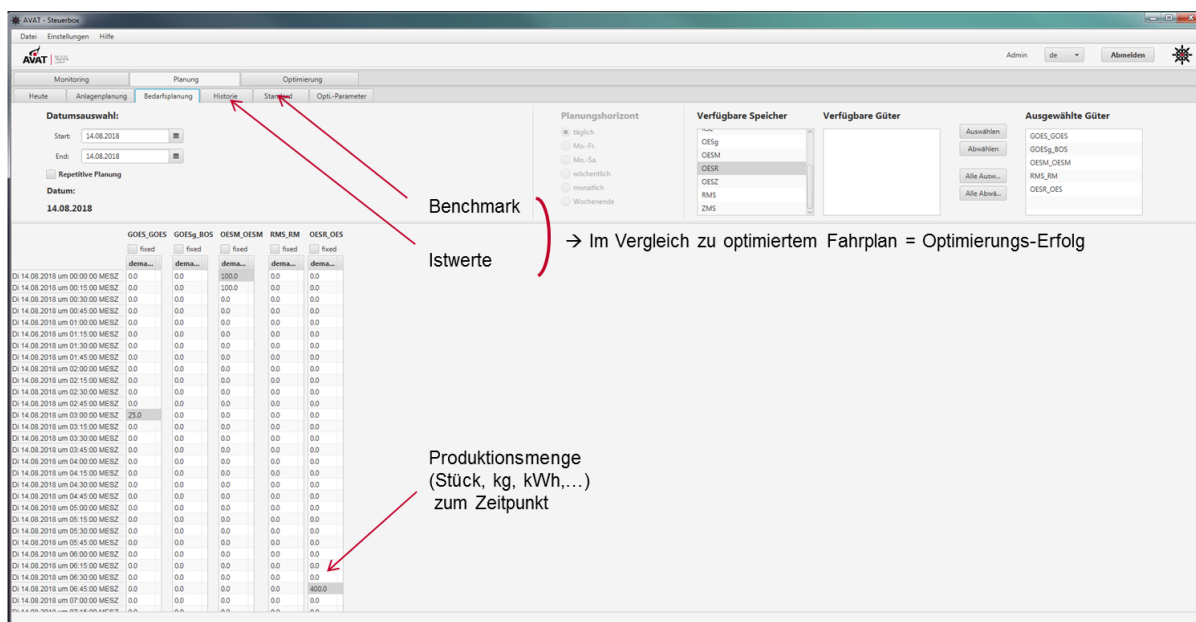


Abbildung 35: Vorgaben für die Produktionsmengen, Quelle: AVAT

### 5.3.3 Optimierung

Im dritten Schritt erfolgt die Optimierung durch den Steuerbox-Algorithmus:



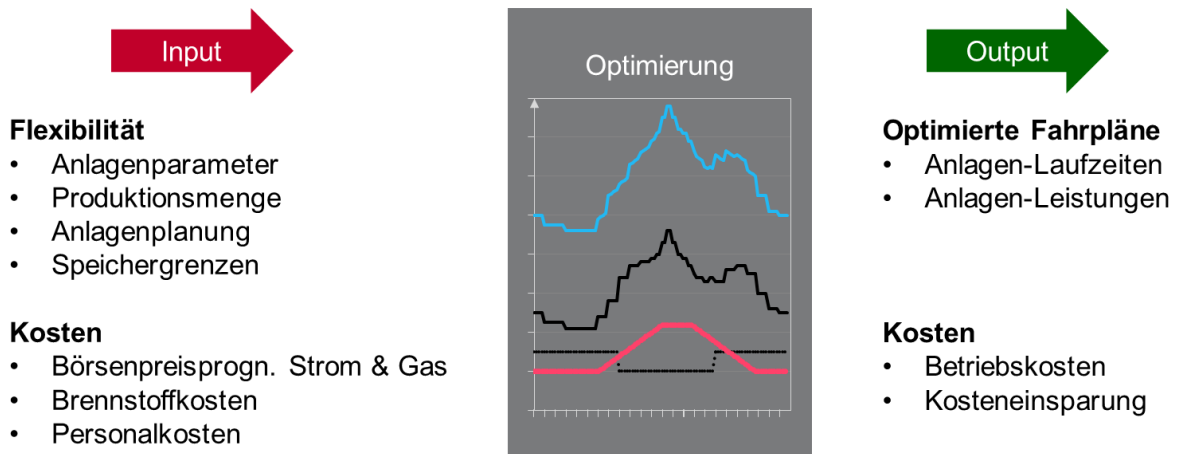


Abbildung 36: Optimierungslauf, Quelle: AVAT

### 5.3.4 Akzeptierung des optimierten Fahrplans

Nach der durchgeführten Optimierung erfolgt die Darstellung des Ergebnisses, welches der Produktionsplaner akzeptieren oder ablehnen kann. Im Falle einer Ablehnung kann wiederholt auf die Gesamtplanung gewechselt werden oder entsprechende Parameter geändert werden, um eine erneute Optimierung zu starten und einen veränderten Fahrplan zu erhalten.

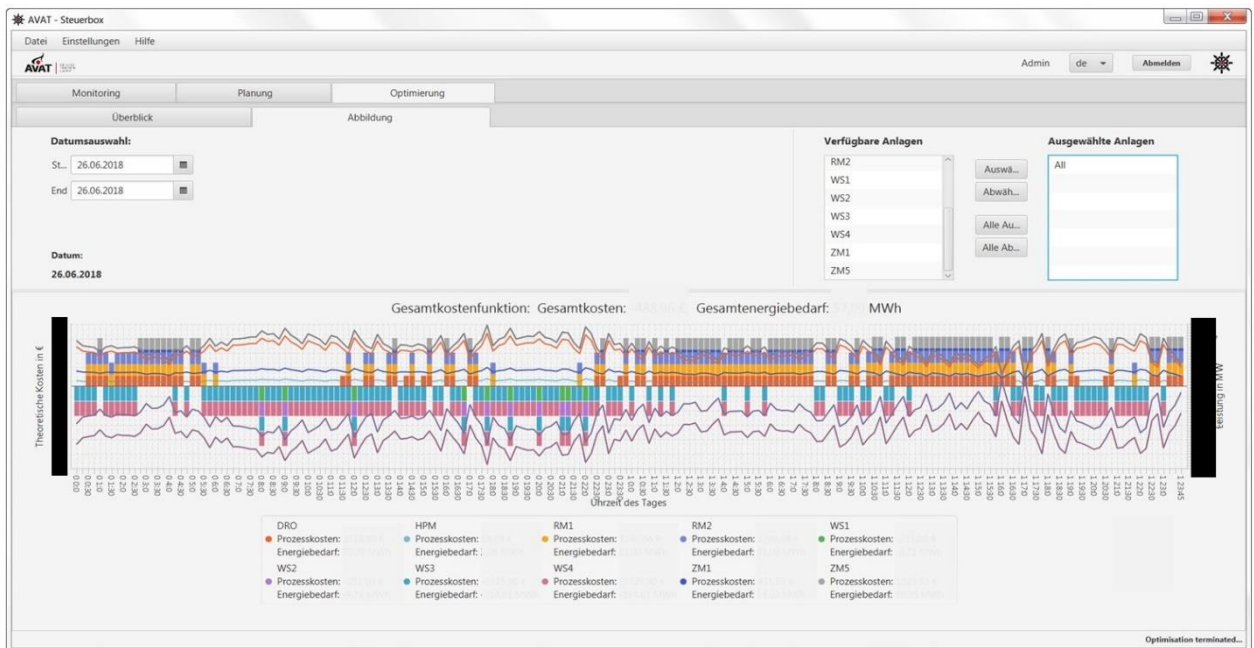


Abbildung 37: Optimierungsergebnis, Quelle: AVAT

## 5.4 Aggregationsebene

Aufgrund des vorzeitigen Ausscheidens des avisierten Pool-Managers (SW Balingen) aus dem Projekt konnte die Aggregationsebene des VK dort nicht installiert und getestet werden. Um die Kommunikation Steuerbox/Aggregationsebene dennoch erproben zu können, wurde auf einen Testaufbau bei der AVAT zurückgegriffen. Es wurden 3 Steuerboxen mit unterschiedlichen Anlagen konfiguriert und mit einer Leitebene verbunden. Als Leitebene diente eine von AVAT modifizierte Standardsoftware.

Hiermit konnte die Kommunikation, sowie die Aggregation der von den Steuerboxen erstellten Fahrpläne/Fahrplänen erfolgreich erprobt werden.

## 5.5 Erfahrungen mit der Kommunikationsplattform

Die Resonanz bei der Vorstellung der entwickelten Kommunikationsplattform bei den beteiligten Musterbetrieben war durchweg positiv. Vor allem der durch die zweigeteilte Optimierung gewährleistete Datenschutz und die Eingriffsmöglichkeit der Produktionsplanung wurde als großer Fortschritt gegenüber etablierter Systeme angesehen.

Die Plattform lässt sich aufgrund der Prozessabstraktion bei allen Musterbetrieben sowie in weiteren Branchen einsetzen.

Konkret wurde die Steuerbox bei Fa. Holcim integriert und wird zurzeit getestet. Im Nachgang des Projektes werden noch konkrete Anpassungen an die speziellen Belange des Unternehmens durchgeführt, damit das System optimal eingesetzt werden kann.

Die Software wird in 2020 von der Fa. AVAT in ein Produkt überführt und kommerziell angeboten (SE<sup>2</sup>OPTIMIZER bzw. SE<sup>2</sup>DIRECTOR, s. Anhang 5).

## 6. Arbeitspaket 6: Geschäftsmodelle für Stadtwerke

Das sechste AP beschäftigte sich inhaltlich mit der Fragestellung, welche Geschäftsmöglichkeiten für ein Stadtwerk bestehen, um als Betreiber oder Aggregator eines Virtuellen Kraftwerks (VK) aufzutreten. Der Fokus richtete sich dabei auf die Entwicklung von Geschäftsmodellen für kleine und mittlere Stadtwerke unter Einbeziehung von verschiedenen Leistungspartnern. Das AP wurde hauptsächlich durch die Stadtwerke Balingen und die Hochschule Reutlingen im Rahmen mehrerer studentischer Arbeiten, sowohl hochschulintern als auch extern im Unternehmen, bearbeitet [Münz2018a], [Münz2018b], [Schnei2019], [Wie2020]. Die Stadtwerke Balingen dienten hierbei aufgrund ihrer Größe und Beschaffenheit als Musterbeispiel für zahlreiche Analysen (z.B. Prozessaufnahme, Wirtschaftlichkeitsberechnungen).

Das Arbeitspaket wurde in mehrere Teilpakete unterteilt, die im Folgenden detaillierter betrachtet werden:

1. Analyse der Wertschöpfung als Basis für die Geschäftsmodellentwicklung
2. Identifikation der Herausforderungen bei der Integration eines VK und der Auswirkungen auf die Unternehmensentwicklung
3. Entwicklung von Geschäftsmodellen als Optionen für Stadtwerke als Betreiber eines VK
4. Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur schematischen Beurteilung der Geschäftsmodelle.

### 6.1 Analyse der Wertschöpfung als Basis für die Geschäftsmodellentwicklung

Für eine adäquate Beurteilung von möglichen Geschäftsmodellen ist es notwendig, die einzelnen Prozesse und die Wertschöpfung eines VK schematisch aufzuarbeiten, d.h. zu klären, welche Akteure beteiligt sind, wie sich die Wertschöpfungskette mit ihren Wertschöpfungsstufen darstellt und welche wesentlichen Aufgaben von wem innerhalb einer Wertschöpfungsstufe erbracht werden müssen.

Die Analyse erforderte zunächst die Erfassung des Wertschöpfungsökosystems eines VK, bei der die beteiligten Akteure, deren Beziehung zueinander und ihre Interaktion miteinander untersucht wurden, und erfolgte sowohl literaturgestützt als auch basierend auf Experteninterviews mit am Projekt beteiligten Partnern und weiteren am Markt aktiven Unternehmen. Abbildung 38 illustriert die zusammengefassten Ergebnisse der Untersuchung und zeigt hierbei die wesentlichen Rollen, welche zum Betrieb eines VKs benötigt werden. Diese Rollen können dabei von einem oder mehreren Akteuren besetzt werden und wurden weiterhin differenziert zwischen externen/internen Schlüsselpartnern und den zentralen Rollen, welche die maßgeblichen Tätigkeiten zum Betrieb eines VKs enthalten.

Die zentralen Rollen sind hierbei wie folgt definiert:

- **Betrieb:** VK-Kunde, der seine Flexibilitätspotenziale dem VK zur Vermarktung zur Verfügung stellt und im Gegenzug für die Bereitstellung vergütet wird.
- **Pool-Manager:** Der Pool-Manager ist für die administrativen und organisatorischen Tätigkeiten innerhalb des VK zuständig. Hierzu gehören die Kundenakquisition und -anbindung, die laufende Betreuung der Schnittstelle zum Kunden sowie die Überwachung und Abrechnung der Kundenverträge.
- **Aggregator:** Der Aggregator ist zuständig für die Durchführung der operativen Tätigkeiten zum Betrieb eines VK. Die Hauptaufgaben des Aggregators sind die Sicherstellung der technischen Funktionalität des VK, die Verarbeitung und Pflege der eingehenden Daten sowie die Fahrplanoptimierung der durch den Pool-Manager zusammengefassten Anlagen. Der Aggregator nimmt somit eine zentrale Rolle innerhalb des Wertschöpfungsökosystems ein und bildet das Herzstück des VK.

## Arbeitspaket 6: Geschäftsmodelle für Stadtwerke

- Händler:** Der Händler ist zuständig für die Vermarktung der optimierten Fahrpläne des Aggregators [Wie2020].

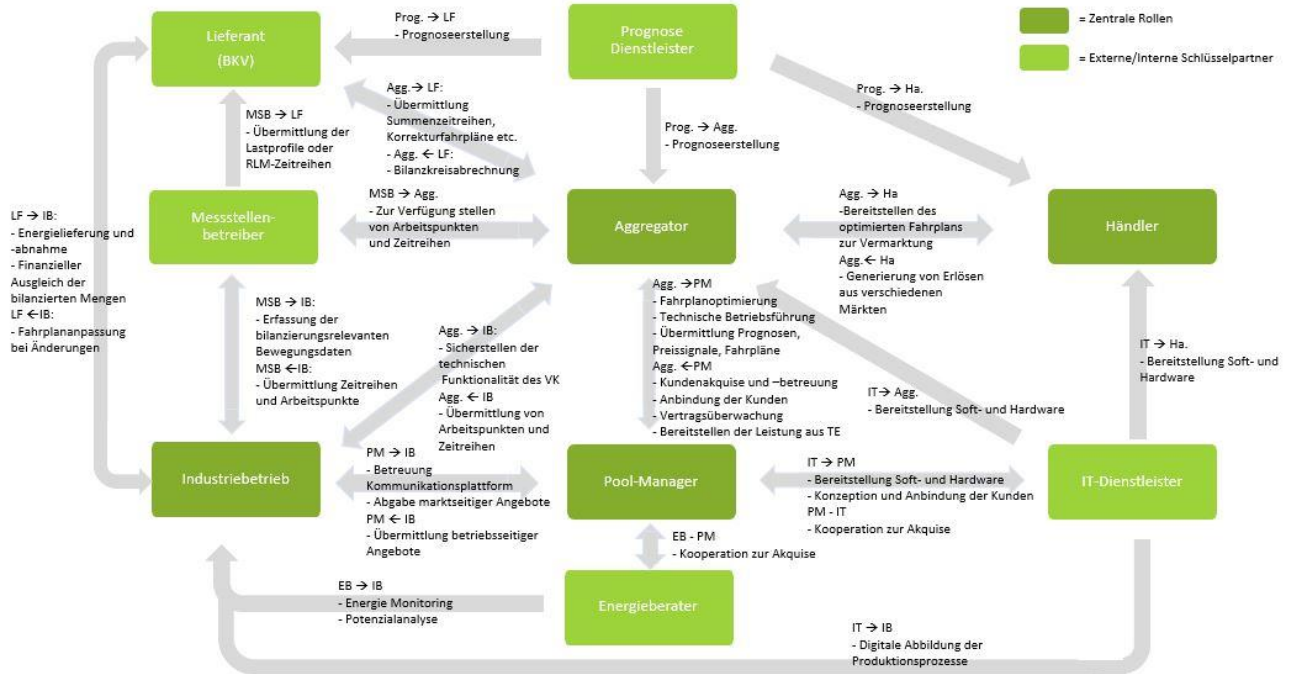


Abbildung 38: Wertschöpfungsökosystem

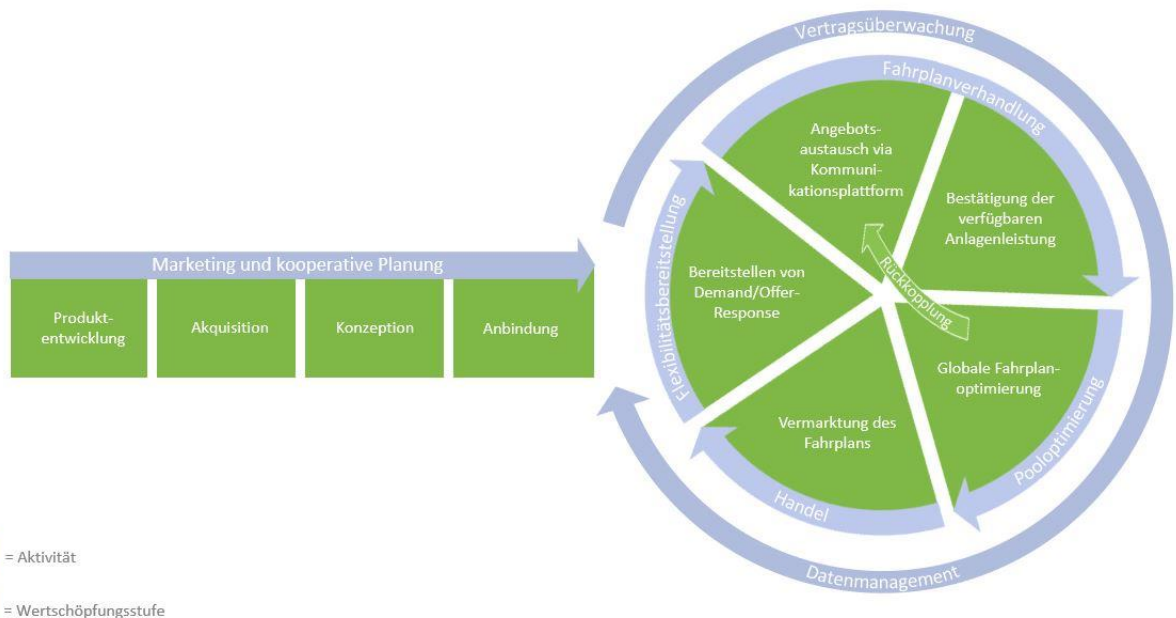


Abbildung 39: Wertschöpfungskette [Wie2020]

Im nächsten Analyseschritt wurden die Aktivitäten der Akteure aus dem Wertschöpfungsökosystem mit der Funktionsweise des VK\_Koop-Ansatzes verknüpft, um eine auf das Projekt zugeschnittene Wertschöpfungskette definieren zu können. Hierzu wurden die wesentlichen Aktivitäten in eine aufeinander aufbauende Abfolge gebracht und anschließend in verschiedene Wertschöpfungsstufen

kategorisiert (s. Abbildung 39). Eine Besonderheit des VK\_Koop-Ansatzes stellt die Rückkopplung zwischen den Aktivitäten „Globale Fahrplanoptimierung“ und „Angebotsaustausch via Kommunikationsplattform“ dar: Zunächst erhalten die Betriebe ein Preissignal (z.B. Prognose für den Day-Ahead-Markt), auf dessen Basis sie ihren Fahrplan (Lasten und Erzeugungsleistungen), unter Nutzung ihrer Flexibilität, optimieren. Diese Strommengen werden mit denen der weiteren angebotenen VK-Teilnehmer in der Aktivität „Globale Fahrplanoptimierung“ aggregiert. Aus dem aggregierten Bedarf wird der Preis ermittelt, der sich dafür auf dem Markt ergibt. Der so ermittelte Preis wird nun als verbesserte Prognose in die Aktivität „Angebotsaustausch via Kommunikationsplattform“ zurückgespiegelt und der Fahrplan in den Betrieben ggf. neu berechnet. Falls die „verbesserte Prognose“ signifikant von der ursprünglichen abweicht, kann sich dieser Vorgang mehrfach wiederholen. Nachdem die Iteration konvergiert, kann jeder Betrieb entscheiden, ob er dem Angebot einen Zuschlag erteilt. Erfolgt der Zuschlag, werden die aggregierten Strommengen zur Beschaffung bzw. zum Verkauf freigegeben.

Abschließend wurden die Ergebnisse aus dem Wertschöpfungsökosystem und der Wertschöpfungskette in einer Prozesslandkarte zusammengefasst (s. Abbildung 40). Es wurde bewusst ein fließender Übergang zwischen den zentralen Rollen gewählt, da eine strikte Trennung der Rollen in der Realität schwierig umzusetzen ist. Die Prozesslandkarte bildet für die weitere Bearbeitung eine theoretische Blaupause, auf deren Basis die Entwicklung der Geschäftsmodelle stattfindet.

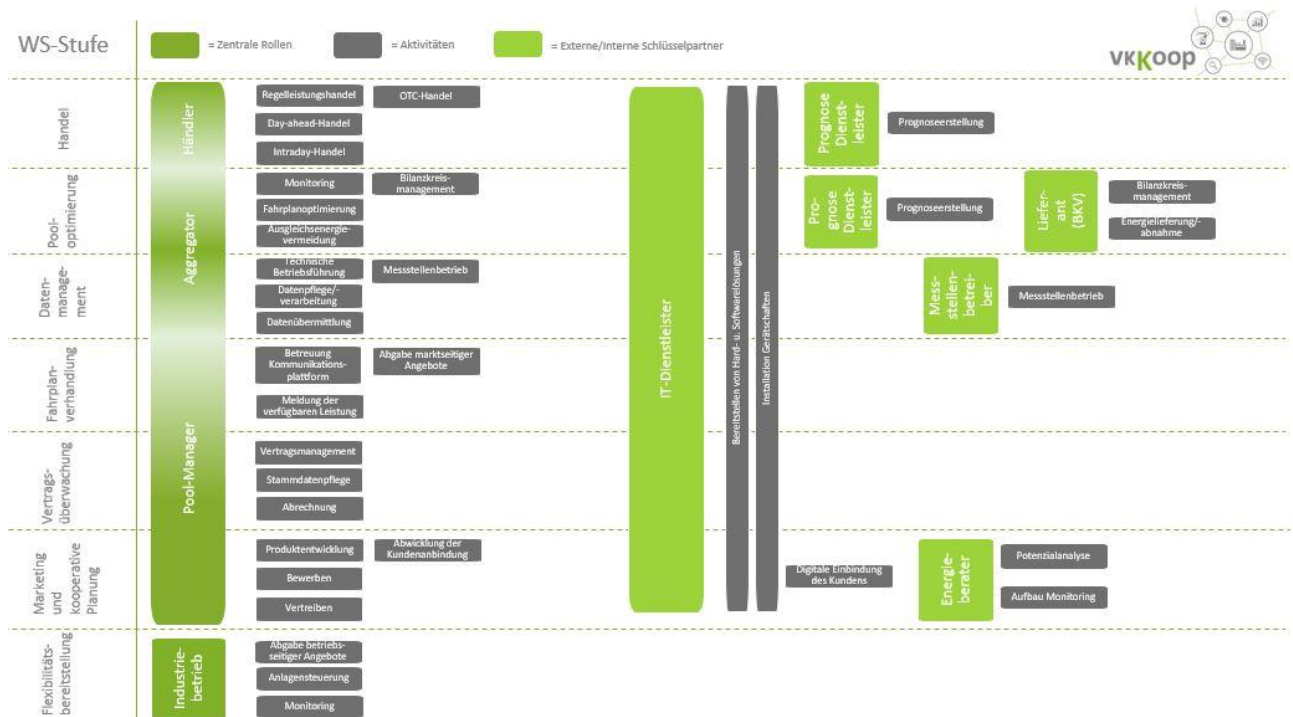


Abbildung 40: Prozesslandkarte [Wie2020]

## 6.2 Identifikation der Herausforderungen bei der Integration eines VK sowie der Auswirkungen auf die Unternehmensentwicklung

Ursprüngliches Ziel des Arbeitspaketes 6 war, die theoretische Entwicklung und Konzeptionierung eines VK-Geschäftsmodells für Stadtwerke exemplarisch in den Stadtwerken Balingen umzusetzen. Für diese geplante Umsetzung eines erfolgreichen Geschäftsmodells musste daher zunächst analysiert werden, welche wesentlichen Herausforderungen ein Stadtwerk bewältigen muss bzw. welche

Voraussetzungen zu schaffen sind. Die erste Herausforderung besteht in der Klärung einer wirtschaftlichen Vermarktungsstrategie. Als potenzielle Vermarktungsoptionen wurden die Erbringung von Regelleistung und der Handel am Spotmarkt (Day-Ahead- und Intraday-Markt) betrachtet. Nach detaillierten Marktanalysen unter Berücksichtigung der historischen Preisentwicklungen und den jeweiligen Markteintrittsvoraussetzungen wurde innerhalb des Projektes die Vermarktung über den Spotmarkt als die erfolgsversprechendste, da wirtschaftlichste, Alternative ausgewählt [Münz2018b]. Die nächste Herausforderung besteht in der Analyse der Wirtschaftlichkeit eines vollumfänglichen Portfoliomanagements inklusive eigenem Handelszugang, um den Ansatz des kooperativen Lastmanagements gänzlich eigenständig umsetzen zu können. Hierfür wurde anhand von vorgegebenen Parametern ein Lastgang nach entsprechenden Marktsignalen optimiert und auf dessen Grundlage ein Businessplan erstellt. Nach einer szenarienbasierten Wirtschaftlichkeitsanalyse des Businessplans wurde festgestellt, dass sich für ein Stadtwerk ohne bereits etabliertes Portfoliomanagement (inklusive Handelszugang) kein positiver Businesscase darstellen lässt, da die Kosten für Aufbau und Betrieb einer solchen Geschäftseinheit (Personal, Geräte und Software) sowie die Etablierung der nötigen Prozesse prohibitiv hoch sind – insbesondere für kleinere und mittleren Stadtwerke, die die Volumengrenze von ca. 1 TWh/a, ab der sich ein eigenes Portfoliomanagement lohnt, in der Regel nicht erreichen [Münz2018b], [Schnei2019].

Basierend auf diesen Erkenntnissen verlagerte sich der Bearbeitungsschwerpunkt des AP weg von der praktischen Alleinumsetzung aller benötigten Prozesse eines VK im Stadtwerk hin zu einer Prüfung von möglichen Geschäftsmodellen unter Einbeziehung verschiedener Kooperationspartner und der allgemeinen Betrachtung der derzeitigen Bedingungen zur Implementierung eines VK. Dies erforderte eine erneute Identifikation der wesentlichen Herausforderungen, welche in Erfolgsfaktoren und erschwerende Faktoren unterteilt wurden. Zu diesem Zweck wurden mehrere qualitative Interviews mit Experten aus bereits am Markt aktiven Unternehmen (Stadtwerke und VK-Dienstleister) geführt, die auch von den Auswirkungen eines VK auf die Unternehmensentwicklung eines Stadtwerks berichten konnten [Wie2020]. Auch die Potenziale und Herausforderungen des im Projekt entwickelten Ansatzes eines kooperativen Lastmanagements wurden in den Experteninterviews beleuchtet. Weiterhin wurde zur weiteren Einschätzung der Herausforderungen und Potenziale des kooperativen Lastmanagements ein Workshop mit Vertretern aus der Industrie und Elektrizitätswirtschaft veranstaltet. Hervorzuheben gilt, dass innerhalb der Experteninterviews mit überwiegender Zustimmung bestätigt wurde, dass sich vor dem Hintergrund des heutigen Marktumfelds der Neuaufbau eines VK als nicht mehr lohnenswert für Stadtwerke darstellt.

Die in den zahlreichen Experteninterviews und dem Workshop ermittelten Erfolgs- und erschwerenden Faktoren werden in Tabelle 2 aufgelistet.

**Tabelle 2: Erfolgs- und erschwerende Faktoren zur Implementation eines VK [Wie2020]**

<b>Erfolgsfaktoren</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Wille und Rückhalt innerhalb der Geschäftsführung</li><li>• Ein Umdenken weg von den herkömmlichen ‚Commodities‘ hin zu innovativen, digitalen Energielösungen</li><li>• Die Verfügbarkeit von Flexibilitäten aus eigenen Erzeugungseinheiten sowie die Möglichkeit zur Kopplung mit dem Wärmesektor (Betrieb eines eigenen Wärmenetzes mit integrierten Speichern)</li><li>• Besonders die Aspekte der Dezentralität, Flexibilität und Digitalisierung erfordern einen Umbau der Netze und machen den Netzbetrieb empfänglich für neue Lösungsansätze</li><li>• Ein ausreichendes Kundenpotenzial innerhalb des Kerngebietes des Stadtwerks</li><li>• Kenntnisse der eigenen Schwächen und die Bereitschaft zur Auslagerung kritischer Prozesse an Dienstleister</li></ul>

Erschwerende Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unzureichende Akzeptanz innerhalb des Stadtwerks</li> <li>• VK erfordert einen auf den Kunden bezogenen Lösungsvertrieb, der sich substantiell vom klassischen ‚Commodity‘-Vertrieb unterscheidet</li> <li>• Ungenügende Wirtschaftlichkeit aufgrund eines zu geringen technischen Potenzials zur Optimierung des VK-Pools</li> <li>• Hürden in der Beschaffungsstruktur, wie z.B. fehlendes eigenes Portfoliomanagement oder die Beschaffung über einen Vollversorungsvertrag</li> <li>• Erschwernis korreliert stark mit der Größe der Stadtwerke, d.h. je kleiner desto weniger potenzielle Kunden und desto beschränkter die Ressourcen</li> <li>• Oftmals kommunale Struktur der Stadtwerke verhindert durch fehlendes Fachwissen der Shareholder eine Budgetfreigabe</li> </ul>

Die Ermittlung der Auswirkungen des Betriebs eines VK auf die Unternehmensentwicklung wurde in drei Aspekte untergliedert: strukturelle, kulturelle und strategische Auswirkungen. Die Ergebnisse aus den qualitativen Experteninterviews sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

**Tabelle 3: Strukturelle, kulturelle und strategische Auswirkungen des VK-Betriebs [Wie2020]**

Strukturelle Auswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ein VK benötigt den Aufbau einer eigenen Geschäftseinheit, welche Einfluss auf die anderen operativen Geschäftsbereiche (Beschaffung, Vertrieb, Marketing, Technischer Dienst) nimmt und zur Abdeckung der unterschiedlichen benötigten Kompetenzen mit erfahrenen Mitarbeitern aus den anderen Geschäftsbereichen besetzt werden sollte</li> <li>• Ein VK nimmt die Rolle eines Kommunikators zwischen den Bereichen ein. Dies erfordert den Ausbau und die Professionalisierung der Kommunikationsschnittstellen innerhalb des Unternehmens für einen zügigen und reibungslosen Austausch</li> </ul>
Kulturelle Auswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die zentrale Rolle des VK intensiviert die interne Abstimmung der beteiligten Bereiche, die sich zunehmend als interne Dienstleister verstehen und die sich gegenseitig zuarbeiten, um den größtmöglichen Nutzen für das Gesamtkonstrukt VK zu erreichen</li> <li>• Die enge Zusammenarbeit und Kommunikation der Bereiche ermöglicht es, die bestehenden Prozesse aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten und aus einer ganzheitlichen Perspektive zu hinterfragen und zu optimieren</li> </ul>
Strategische Auswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch die zentrale Rolle des VK müssen so gut wie alle Entscheidungen, die einen im VK involvierten Bereich betreffen, unter Einbeziehung des VK entschieden werden</li> <li>• Die Selbstwahrnehmung eines Stadtwerks als klassischer Versorger ändert sich hin zu einem kundenorientierten Energiedienstleister</li> <li>• Ein VK bietet einen strategischen Ansatz zur Besetzung einer Vorreiterrolle in der Energiewende, Bewältigung einer zunehmenden dezentralen Erzeugungsstruktur, Erschließung von Anlagen im Post-EEG-Zeitalter, Vertiefung der Sektorenkopplung und Nutzung von Digitalisierungspotenzialen</li> </ul>

Die in dem Workshop und in den Experteninterviews erfassten Potenziale und Herausforderungen des kooperativen Lastmanagements sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Potenziale und Herausforderungen des kooperativen Lastmanagements [Wie2020]

Potenziale
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prinzipiell großes Potenzial, allerdings sind die Betriebe je nach Branche teilweise schwer vergleichbar</li> <li>• Eine fortschreitende Sensibilisierung der Industrie für Klimabelange ist beobachtbar</li> <li>• Dezentraler Optimierungsansatz wahrscheinlich einzig machbare Lösung zur Anbindung von Betrieben an ein VK</li> <li>• Eine vollständige Belieferung über den Spotmarkt geht mit nicht planbaren Risiken einher, so dass davon auszugehen ist, dass weiterhin ein Großteil der Energielieferung über Futures beschafft wird</li> <li>• Die Vermarktung von Reststrommengen über den Spotmarkt stellt derzeit die wirtschaftlichste Strategie dar, um den Kunden einen bestmöglichen Mehrwert zu garantieren</li> <li>• Weitere Vermarktungspotenziale liegen in den „Zukunftsmärkten“, wie der Einführung netzdienlicher Märkte sowie dem Aufbau von VK-internen Handelsplätzen</li> </ul>
Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Je nach Komplexität der individuellen Produktionsprozesse eines Betriebes ist zu beachten mit wie viel Aufwand die digitale Abbildung der Prozesse verbunden ist. Besonders bei Prozessen, die eine geringe Leistung aufweisen, kann es zu einem kritischen Kosten-Nutzen-Verhältnis kommen</li> <li>• Die Einleitung eines kulturellen Wandels innerhalb der Betriebe, bei denen die Produktionsplanung nicht mehr nach eigenem Ermessen bestimmt wird, sondern durch externe Strompreissignale mit beeinflusst wird</li> <li>• Die derzeitige Vermarktungsstrategie ist stark abhängig von den an den Spotmärkten auftretenden Preisspreads</li> <li>• Das Erreichen einer ausreichenden Skalierbarkeit, so dass sich fortlaufende Verbesserungen und Anpassungen des Optimierungsalgorithmus rechnen</li> <li>• Regulatorische Hindernisse bedingt durch die derzeitige Netzregulierung</li> </ul>

### 6.3 Entwicklung von Geschäftsmodellen als Optionen für Stadtwerke als Betreiber eines VK

Die Entwicklung der Geschäftsmodelle fußt im Wesentlichen auf den bisher gewonnen Erkenntnissen sowie auf der Analyse von Geschäftsstrategien, die bereits von am Markt aktiven Unternehmen umgesetzt werden. Für eine schematische Erfassung der in der Praxis umgesetzten Prozesse wurde mit den erwähnten Gesprächspartnern, bestehend aus Stadtwerken, Aggregatoren und IT-Dienstleistern sowie den Teilnehmern des Workshops, eine Prozessaufnahme durchgeführt [Wie2020]. Hierbei wurde der Fokus auf die Prozesse gelegt, welche zum Betrieb eines VK in Eigenregie umgesetzt und welche an einen Dienstleister ausgelagert werden müssen. Als Vorlage zur Prozessaufnahme diente die in Kapitel 6.1 vorgestellte Prozesslandkarte.

Im nächsten Schritt wurden unterschiedliche Prozesslandkarten gegenübergestellt und ausgewertet. Bei der Auswertung konnten auf Basis der von [Gassm2013] entwickelten Geschäftsmodelltypologien drei Geschäftsmodellansätze identifiziert werden. Die Geschäftsmodellansätze unterscheiden sich maßgeblich durch die Strategie, mit der sich die Stadtwerke innerhalb der Wertschöpfungskette positionieren und dementsprechend mit den externen Dienstleistern kooperieren. Basierend auf den ermittelten Ansätzen wurden mittels des Business-Model-Canvas-Ansatzes nach [Oster2011] drei Geschäftsmodelle als Optionen für kleine und mittlere Stadtwerke entwickelt. Abbildung 41 liefert hierzu einen Überblick über die wesentlichen Merkmale der Geschäftsmodelle.

Die Besonderheiten der drei Geschäftsmodelle werden im Folgenden kurz dargestellt.



**Orchestrator:** Als Orchestrator fungiert ein Stadtwerk als Mediator zwischen verschiedenen spezialisierten Dienstleistern aus dem Energie- und IT-Sektor. Das Stadtwerk lässt die Aktivitäten, welche außerhalb der Kernkompetenzen des Stadtwerks liegen, von spezialisierten Dienstleistern durchführen und koordiniert dabei deren individuelle Kompetenzen. Das Geschäftsmodell bietet den Vorteil, dass sich das Stadtwerk überwiegend auf seine Kernkompetenzen fokussiert und die VK-betreffenden Aufwände für Betriebs-, Anpassungs- sowie Verbesserungsmaßnahmen an einen Dritten auslagert. Dem Orchestrator bieten sich vor allem Wettbewerbsvorteile durch eine flexible Auswahl an hochspezialisierten IT-Dienstleistern, von deren spezifischer Innovationskraft profitiert werden kann [Gassm2013]. Allerdings ist das Koordinieren mehrerer Dienstleister mit Aufwand verbunden und es fallen hohe Transaktionskosten an. Generell besteht die Gefahr, dass das Stadtwerk keine ausreichende Poolgröße für einen wirtschaftlichen Betrieb des VK erreicht.

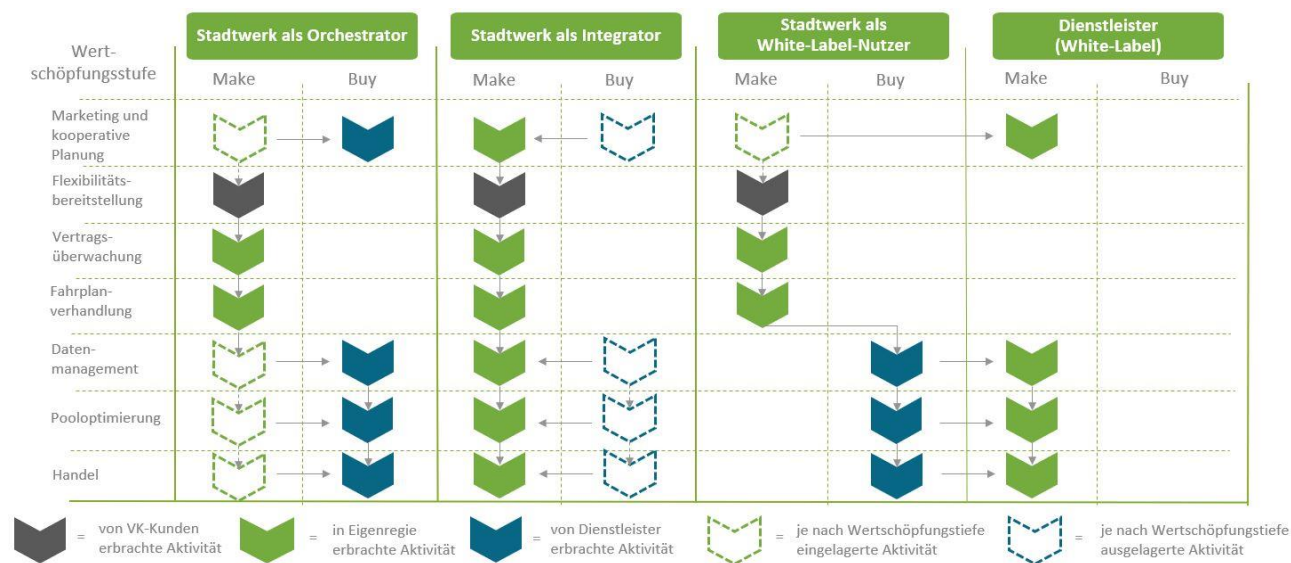


Abbildung 41: Geschäftsmodelle für Stadtwerke [Wie2020]

**Integrator:** Das Geschäftsmodell des Integrators beinhaltet die schrittweise Integration von spezifischen Aktivitäten zum Ausbau der internen Wertschöpfungstiefe und -kompetenz. Dem Stadtwerk wird dadurch ermöglicht, seine Unabhängigkeit von Dritten zu wahren und die Kontrolle über die eigenen Schlüsselaktivitäten und -ressourcen zu behalten. Dadurch ist ein Integrator in der Lage, die Wertschöpfung optimal auf seine eigenen Bedürfnisse und Prozesse abzustimmen [Gassm2013]. Eine hohe Wertschöpfungstiefe erlaubt eine einfache Ausweitung des Produktportfolios mit Produkten, die auf bereits bestehenden Strukturen aufbauen, wie z.B. dem Angebot einer White-Label-Lösung. Zusammenfassend baut das Stadtwerk zunehmend Expertise im VK-Bereich auf und nimmt eine feste Position im Nischenmarkt VK ein. Die Ausführung des Großteils der Aktivitäten in Eigenregie erfordert einen hohen Implementierungsaufwand zur Schaffung der erforderlichen Strukturen und zur Aneignung des notwendigen Fachwissens. Ebenso fallen hohe Fixkosten durch den hohen Personal- und Betriebsaufwand an, weshalb eine ausreichende und skalierbare Poolgröße zwingend notwendig ist.

**White-Label-Nutzer:** Als White-Label-Nutzer bezieht ein Stadtwerk ein bereits fertiges VK-Produkt, dessen technische und operative Betriebsführung weiterhin beim White-Label anbietenden Dienstleister verbleibt. Lediglich nach außen hin präsentiert sich das Stadtwerk als ein innovativer VK-Betreiber, ohne über die notwendigen Kapazitäten und Kompetenzen zu verfügen [Gassm2013]. Somit ist es dem Stadtwerk möglich, sich vollkommen auf seine Kernkompetenzen zu fokussieren, wozu in erster Linie die Kundenakquisition und die nachgelagerte Kundenbetreuung bzw. -verwaltung zählt. Die White-Label-Nutzung ermöglicht somit eine verhältnismäßig einfache Erweiterung

zung des Produktportfolios, bei der nur geringe strukturelle Anpassungen mit geringen Investitionen vorgenommen werden müssen. Durch die Anbindung der Anlagen an den Pool des Dienstleisters verlagert sich somit auch das Risiko einer unwirtschaftlichen Poolgröße weitestgehend auf den Dienstleister. Allerdings begibt sich das Stadtwerk in ein enges Abhängigkeitsverhältnis, so dass mit beschränkten individuellen Weiterentwicklungschancen zu rechnen ist – allein durch die Tatsache, dass der White-Label-Nutzer in der Regel ein Nutzer unter vielen ist.

## 6.4 Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur schematischen Beurteilung der Geschäftsmodelle

Zur schematischen Beurteilung der in Kapitel 6.3 erarbeiteten Geschäftsmodelle wurde eine Bewertungsmethodik (s. Abbildung 42) entwickelt, um die Geschäftsmodelle unter einheitlichen Bedingungen prüfen zu können [Wie2020]. Die Bewertungsmethodik dient hierbei in erster Linie als Vorlage, welche durch individuelle Gegebenheiten und Bedürfnisse der Stadtwerke weiter ergänzt werden sollte. Zur Bewertung wurde auf eine Nutzwert-Kostenanalyse in Anlehnung an [Rinza1992] zurückgegriffen, so dass sowohl der qualitative Nutzen in Form von Punktwerten als auch die quantitativen Kosten in Form von Geldwerten durch die Bildung eines Quotienten miteinander ins Verhältnis gebracht und verglichen werden können [Rinza1992]. Der Bewertungsansatz stellt sich in diesem Kontext als vorteilhaft dar, da verschiedene Alternativen betrachtet werden, deren individuelle Vorteilhaftigkeit sich nicht einzig an quantitativen Größen messen lässt.

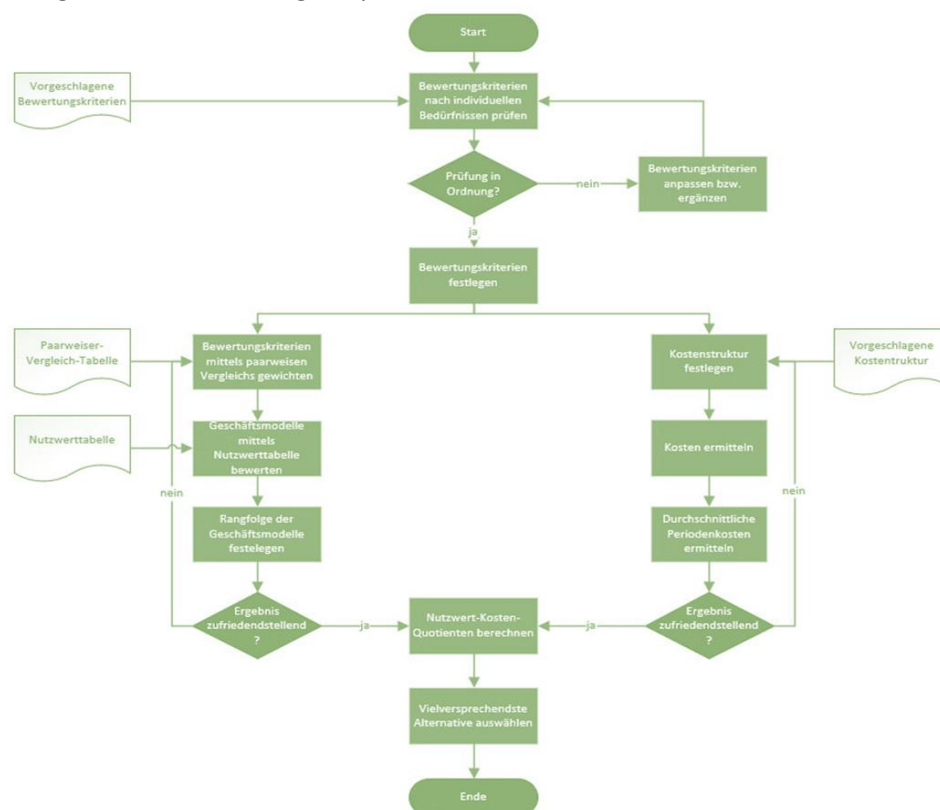


Abbildung 42: Bewertungsmethodik Nutzwert-Kostenanalyse [Wie2020]

Zur Ermittlung der quantitativen Geldwerte wird eine Kostenvergleichsrechnung vorgeschlagen, bei der die wesentlichen Kostenpositionen der unterschiedlichen Geschäftsmodelle ermittelt werden, um anschließend die Kosten pro Periode ableiten zu können. Die vorgeschlagenen qualitativen Bewertungskriterien für die Nutzwertanalyse sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Qualitative Bewertungskriterien [Wie2020]

Strategisch Bewertungskriterien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übereinstimmung mit Unternehmenszielen</li> <li>• Auswirkungen eines Dienstleistungsausfalls</li> <li>• Synergieeffekte mit bestehendem Produktportfolio</li> <li>• Individuelle Weiterentwicklungsmöglichkeiten</li> <li>• Time-to-Market</li> </ul>
Strukturelle/kulturelle Bewertungskriterien
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eigene Kooperationsfähigkeit</li> <li>• Organisatorischer Implementierungsaufwand</li> <li>• Flexibilisierung des Kapazitätsmanagements</li> <li>• Bedarf an Kompetenzentwicklung bzw. -weiterentwicklung</li> <li>• Zugang zu fachspezifischem Wissen</li> </ul>

Die zur Kostenvergleichsrechnung vorgeschlagene Kostenstruktur der Geschäftsmodelle wird in Tabelle 6 vorgestellt.

Tabelle 6: Kostenstruktur [Wie2020]

Vorgeschlagene Kostenstruktur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable Kosten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Leistungsgebundene Dienstleistungsentgelte</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fixkosten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Lizenzgebühren</li> <li>○ Marketing und Vertriebskosten</li> <li>○ Dienstleistungsentgelte</li> <li>○ Personalkosten</li> <li>○ Entwicklungskosten</li> <li>○ Wartungs- und Betriebskosten</li> <li>○ Kapitalgebundene Kosten</li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonstige Kosten                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Transaktionskosten</li> <li>○ Fortbildungskosten</li> </ul> </li> </ul>

## 6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Aufbau eines skalierbaren VKs unter heutigen Marktbedingungen ohne die Beteiligung von Kooperationspartnern für kleine und mittlere Stadtwerke schwierig umzusetzen ist [Löb2021]. Dieser Umstand ist jedoch nicht per se als negativ zu bewerten, da die Stadtwerke sich zunehmend auf ihre wichtigste Schlüsselressource, die Nähe zum Kunden, konzentrieren und sich zunehmend als Energiedienstleister und Kundenberater für Energielösungen verstehen. Das Stadtwerk besetzt somit eine entscheidende Schlüsselposition als Multiplikator für die spezialisierten Produkte der potenziellen Kooperationspartner. Die Kooperationspartner sind dabei auf die Stadtwerke angewiesen, da ihnen häufig die Kompetenz der regionalen Problemlösefähigkeit und die Ressource des Kundenzugangs fehlen. Die Integration eines VK stellt dabei einen treibenden Faktor zur Förderung des Wandels hin zu einem Energiedienstleister dar. Bedingt durch den VK-Betrieb intensiviert sich die Zusammenarbeit der stadtwerkinternen Abteilungen und begünstigt die Entwicklung einer innerbetrieblichen Dienstleistungsmentalität, wodurch bereits von innen ein kultureller Wandel eingeleitet wird.

Bei der Betrachtung der Herausforderungen zur Implementierung eines VK hat sich gezeigt, dass besonders die strukturellen Hürden innerhalb des Stadtwerks eine entscheidende Rolle bei der Auswahl eines geeigneten Geschäftsmodells, bzw. bei der Entscheidung zur Positionierung innerhalb der Wertschöpfungskette, darstellen. Es liegt somit nahe zu behaupten, dass ein Stadtwerk mit einer bereits etablierten Beschaffungsabteilung bzw. Portfoliomanagement eher dazu bereit ist, ein VK im Sinne des Orchestrators oder Integrators zu betreiben, während ein Stadtwerk mit einer im Vorhinein outgesourceten Beschaffung eher zu einer White-Label-Lösung greift. Ersteres dürfte dementsprechend eher für große, letzteres für mittlere und kleine Stadtwerke zutreffen. Trotzdem sollten die weiteren Faktoren, wie die individuelle strategische Ausrichtung, die finanziellen und personellen Kapazitäten, das verfügbare Poolpotenzial und die Verfügbarkeit von eigenen technischen Assets, bei der individuellen Betrachtung nicht vernachlässigt werden.

Somit bietet das VK eine Reihe von strategischen Ansätzen zur Gewährleistung der Zukunftsfähigkeit von Stadtwerken: Vorreiterrolle in der Energiewende, Positionierung als Energiedienstleister, Wachstum in neuen Märkten, Marktpotential der Anlagen im „Post-EEG-Zeitalter“, Nutzung von Digitalisierungspotentialen, Ausbau der Querverbund-Geschäfte, Sektorenkopplung.

Darüber hinaus fällt die Bewertung des kooperativen Lastmanagements positiv aus und stieß bei den interviewten Stadtwerken und Aggregatoren auf Interesse. Dem Ansatz der dezentralen Optimierung bei gleichzeitigem Verbleib der Daten- und Steuerungshoheit innerhalb des Betriebes wird von den Stadtwerken ein vielversprechendes Potenzial zugeschrieben und teilweise als einzig machbare Lösung im industriellen Kontext angesehen. Begünstigend stellt sich der derzeitige Trend einer zunehmenden Sensibilisierung der Industrie für Klimabelange dar und dass ein VK ein detailliertes Energiemonitoring voraussetzt, welches die Grundlage für weitere innerbetriebliche Energieeffizienzmaßnahmen bildet. Allerdings bedarf es eines kulturellen Wandels innerhalb der Industrie, da die Produktionsplanung beim kooperativen Lastmanagement durch zusätzliche externe Preissignale und den damit verbundenen Wechselwirkungen beeinflusst wird.

Als nachteilig stellen sich bisher die begrenzten Vermarktungsmöglichkeiten des kooperativen Lastmanagements dar. Aufgrund der unzureichenden Erlöspotenziale im Regelleistungsmarkt beschränkt sich die Vermarktung aktuell auf die Spotmärkte mit derzeit geringen Preisspreads. Dieser Umstand wirkt sich auch kundenseitig negativ aus. Dem Stadtwerkekunden kann keine Sicherheit gegeben werden, kostendeckende Erlöse erzielen zu können, weshalb sich eine Anpassung der Prozesse an die erwarteten Strompreise häufig als nicht lohnend darstellt.

Es besteht allerdings die Hoffnung, dass durch den weiteren Zubau der erneuerbaren Energien die Volatilität an den Spotmärkten steigt. Weitere Vermarktungspotenziale liegen vor allem in den „Zukunftsmärkten“, wie z.B. der Einführung von netzdienlichen Flexibilitätsmärkten zur effizienten Behebung von Netzengpässen oder dem Aufbau einer VK-internen Peer-to-Peer-Handelsplattform [VDE2018]. Neben der Erschließung neuer Vermarktungsstrategien sollten außerdem die regulatorischen Hindernisse abgebaut werden. Besonders im Bereich der Netzentgelte wäre es wünschenswert, den Netzbetreibern einen Anreiz zu bieten, die Netzentgelte durch die Nutzung von Flexibilitäten aus einem VK zu senken, ohne dass die erzielten Einsparungen eine durchlaufende Kostenposition darstellen. Auch stellt sich die rechtliche Stellung von Stromspeichern als nachteilig dar, da sie nach wie vor zur Entrichtung von Letztverbraucherabgaben wie Netzentgelte, EEG-Umlagen etc. verpflichtet sind [VDE2019].

## 7. Fazit

Mit dem Erscheinen des Entwurfs der VDI 5207 unmittelbar vor Projektende zeigt sich, dass die Flexibilisierung von Industrie-Prozessen inzwischen im Technischen Regelwerk angekommen ist. Das Projekt VK\_Koop geht aber weit über die reine Beschreibung und Typisierung hinaus und seine Ergebnisse verbessern schon heute die Beratungs- und Projektarbeit der beteiligten Partner.

Das Projekt hat alle gesteckten Ziele erreicht. Nach der Anpassung der Arbeitspakete 4 bis 6 im Mai 2018 und Juni 2019 konnten Synergien zu parallel laufenden Projekten im Kontext des Virtuellen Kraftwerks Neckar-Alb genutzt werden. Dadurch gelang es, deutlich anspruchsvollere Aufgaben zu erledigen, als ursprünglich formuliert waren. Insbesondere entwickelten die Partner:

- Ein Vorgehen bei der Akquisition neuer Teilnehmer
- Eine systematische Erfassung von Flexibilität, die teilweise gleichzeitig Effizienzverbesserungen hervorbringt
- Eine Kopplung an die Produktionsplanung mit weitgehend automatisierter Fahrplanerstellung<sup>5</sup>
- Eine Software-Plattform zur Aggregation der Dienstleistungen verschiedener Betriebe<sup>6</sup>
- Eine systematische Evaluierung der Rolle von Stadtwerken bei der Flexibilitätsvermarktung rundet die Ergebnisse ab.

Der Aufbau eines Virtuellen Kraftwerks stellt sich dennoch als schwierig dar, da die Betriebe heute keine oder nur geringe Anreize sehen, von der Vollversorgung auf ein anderes Tarifmodell zu wechseln. Diese Situation kann in wenigen Jahren grundlegend ändern, wenn nach einem flächendeckenden Smart-Meter-Rollout nur noch zeitvariable Tarife angeboten werden. Dann benötigen, besonders KMU, externes Know-how, um die Situation meistern zu können. Insbesondere wird eine Zeitskalen-Anpassung notwendig, sie benötigen Strompreis-Vorhersagen für ihren Planungshorizont, typischerweise 24h bis 48h.

Auf der Seite des Stromhandels verhindern die aktuellen Regularien weitgehend eine Vergütung für netzdienliches Verhalten auf der Ebene der Verteilnetze. Der ursprüngliche Ansatz, einem kleinen Stadtwerk die Rolle des Aggregators zuzuweisen ist dennoch zukunftsfähig. Auch wenn es heute finanziell damit überfordert ist, so kann es, mit der Hilfe externer Dienstleister, doch seine Kernkompetenz, die Kundennähe, ausspielen. Damit ergibt sich auch die Chance, Betriebe, die zu einem anderen Versorger abgewandert sind, wieder für sich zu gewinnen.

---

<sup>5</sup> Die entwickelten Algorithmen werden 2020 in einem kommerziellen Software-Paket angeboten

<sup>6</sup> Auch hierfür wird 2020 ein Software-Paket angeboten

## 8. Kommunikation und Verbreitung

### 8.1 Interner Austausch

Alle Partner trafen sich zu einem Kick-off-Meeting und danach zweimal jährlich zu 6 Review-Meetings, die jeweils ein Partner organisierte. Dabei wurden die Fortschritte der Arbeitspakete vorgestellt und Entscheidungen zum weiteren Vorgehen getroffen. Neben dem Protokoll der Meetings verschickte die Projektleitung einen Newsletter, den auch die Musterbetriebe und Unterstützer erhielten, um sie auf dem Laufenden zu halten.

Im Rahmen der verschiedenen Arbeitspakete fanden etwa 30 Workshops und Telefonkonferenzen statt. Dabei waren auch immer die Partner der angrenzenden Arbeitspakete eingeladen, so dass ein reger Austausch stattfand. Die Schnittstelle zwischen den Arbeitspaketen 1, 2 & 3 sowie 4 war für den Projektfortschritt von zentraler Bedeutung, da die Musterbetriebe in den verschiedenen Bearbeitungsphasen von drei Partnern betreut wurden. Bei den Abschlussgesprächen äußerten sich alle Betriebe zufrieden mit diesem Ablauf.

Im Zuge der täglichen Bearbeitung erfolgte der Austausch über zahlreiche bilaterale Telefonate und Mails. Allein im Mail-Archiv der Projektleitung befinden sich ca. 2.000 Mails mit Bezug zum Projekt.

### 8.2 Öffentliche Präsentationen

Die Projektergebnisse wurden auf einer Reihe von Tagungen und Veranstaltungen der Öffentlichkeit vorgestellt, dabei waren potentielle Multiplikatoren und Interessenten die primäre Zielgruppe, ein Vortrag wurde auch bei einer internationalen Tagung angenommen. Darüber hinaus wurde die Idee des kooperativen Lastmanagement in zahlreichen Diskussionen auf Tagungen und in Fachkreisen verbreitet. Kurz vor Projektende erhielt ein Partner eine Einladung zu einem Beitrag in einem Sammelband, der Anfang 2021 erscheinen wird [Löb2021].

Präsentationen erfolgten bei folgenden Veranstaltungen:

- Stadtwerkeausschuss Balingen, 21.3.2017
- Stadtwerkeausschuss Reutlingen, 13.4.2017
- Planungsausschuss Regionalverband Neckar-Alb, 2.5.2017
- Regionalverband Neckar-Alb, 9.5.2017
- Abwasserzweckverband Balingen, 15.5.2017
- IHK Innovationstage „Smart Meter“, 11.7.2017
- Reutlinger Energiediskurs, 29.9.2017
- IHK Workshop „Sicheres Smart Home“, 6.11.2017
- IHK Informationsveranstaltung „Virtuelle Kraftwerke“, 29.11.2017
- IHK e2m-Dialog, 11.4.2018
- TECHtogether, Ludwigsburg, 22.10.2018
- Reutlinger Energiediskurs, 20.11.2018
- Clusterkonferenz Energietechnik Berlin-Brandenburg, 5.12.2018
- IHK Workshop „Virtuelle Kraftwerke“, 14.12.2018
- Popup Labor WiMi BW, Balingen, 30.1.2019
- Besuch des DBU-Generalsekretärs, 8.3.2019
- Fachgespräch Unternehmensgrün, Berlin, 26.3.2019
- IHK Info-Veranstaltung „Eigenstromerzeugung“, 16.5.2019
- IHK Workshop „Stromausfallstudie“, 22.8.2019
- Werkstattgespräch „Virtuelles Kraftwerk als Kooperationsmodell“, Stuttgart, 22.10.2019
- ThEGA-Forum 2019, Weimar, 24.10.2019

- FSR Symposium „Variable Generation, Flexible Demand“, Florenz, Italien, 19.2.2020
- Workshop im Rahmen des Open Innovation Kongress Baden-Württemberg 2020, 2.3.2020





## Literaturverzeichnis

- [Brug2018]** Brugger, Martin; Selleneit, Volker; Richter, Christoph; Reinhart, Gunther: *Potenzialanalyse zur Energiekostenoptimierung von Produktionsanlagen*. DOI 10.3139/104.111969 ZWF 113 (2018) 9; page 535–539 © Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, ISSN 0032–678X
- [dena2016]** *Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem*. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). 2016.
- [EN16247]** DIN EN 16247-1:2012-10: *Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 16247-1:2012*. Beuth Verlag GmbH, Oktober 2012.
- [Fimm2017]** Fimmers, C.; Brecher, C.: *Energy-as-a-Service"- Dienstbasiertes, modulares Leitsystem zur energieflexiblen Fertigung*, in: *Industrie 4.0 - Wertschöpfungspotentiale in der dienstebasierten Produktion*, Jährliches Treffens von Mitarbeitern des WZL der RWTH Aachen, der Institute des PTZ Berlin und des ISW der Universität Stuttgart, 2017, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik \* Band 698 (2018) Seite 45-56, VDI-Verlag, ISBN: 978-3-18-369802-8
- [Gassm2013]** Gassmann, O., Frankenberger, K. und Csik, M.: *Geschäftsmodelle entwickeln: 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator*. München : Carl Hanser Verlag, 2013. S. 198, 252, 347.
- [Heim2019]** Heimgaertner, F., S. Heider, T. Stueber, D. Merling, and M. Menth: *Load Profile Negotiation in Day-Ahead Planning for Compliance with Power Limits*. Proceedings of the ETG Congress 2019, Esslingen, Germany, May 2019.
- [Heim2018a]** Heimgaertner, F., T. Sachs, and M. Menth: *ClassCast: A Tool for Class-Based Forecasting*. Proceedings of the 19th International GI/ITG Conference on Measurement, Modelling and Evaluation of Computing Systems, Erlangen, Germany, February 2018.
- [Heim2018b]** Heimgaertner, F., U. Ziegler, B. Thomas, and M. Menth: *A Distributed Control Architecture for a Loosely Coupled Virtual Power Plant*. Proceedings of the ICE/IEEE International Technology Management Conference (ICE/IEEE ITMC), Stuttgart, Germany, June 2018.
- [Heim2018c]** Heimgaertner, F. and M. Menth: *Distributed Controller Communication in Virtual Power Plants Using Smart Meter Gateways*. Proceedings of the ICE/IEEE International Technology Management Conference (ICE/IEEE ITMC), Stuttgart, Germany, June 2018.
- [Hötz2018]** Hötzel, R.: *Geschäftsmodelle für Flexibilität in produzierenden Unternehmen*. Hochschule Reutlingen, 2018.
- [ISO50001]** DIN EN ISO 50001:2018-12, *Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung (ISO 50001:2018); Deutsche Fassung EN ISO 50001:2018*. Beuth Verlag GmbH, Dezember 2018.
- [KMU2015]** *Benutzerleitfaden zur Definition von KMU*. Europäische Union 2015.
- [Oster2011]** Osterwalder, A. und Pigneur, Y.: *Business Model Generation: Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer*. Frankfurt am Main : Campus Verlag, 2011.
- [Löb2021]** Löbbe, S., Hagenlocher, H., Hackbarth, A.: *Industrial demand flexibility: A German case study*. In: Sioshansi, F. (Hrsg.): *Variable generation, flexible demand*. Academic Press, 2021, forthcoming.
- [Mee2019]** Meese, J. und Dahlmann, B., *Realisierung eines dynamischen Stromtarifs für Industrieunternehmen – automatische Vermarktung von Lastflexibilität am Spotmarkt*, in *Realisierung Utility 4.0 Band 1*, Oliver D. Doleski Hrsg., S. 599ff, Springer Vieweg, Wiesbaden 2019
- [Münz2018a]** Münz, A.: *Geschäftsmodelle für Stadtwerke als Betreiber oder Aggregator von Virtuellen Kraftwerken*. Forschungs- und Entwicklungsarbeit, Hochschule Reutlingen, 2018.
- [Münz2018b]** Münz, A.: *Geschäftsmodell und Businessplan für ein virtuelles Kraftwerk in einem Energieversorgungsunternehmen*. Masterarbeit, Hochschule Reutlingen, 2018.

- [Reinh2014a]** Reinhart, Gunther; Schultz, Cedric: *Herausforderungen einer energieorientierten Produktionssteuerung*, Zeitschr. f. wirtsch. Fabrikbetrieb, Heft 01-02/2014, S. 29-33, ISSN: 0932-0482
- [Reinh2014b]** Reinhart, Gunther: *Herausforderungen einer energieorientierten Produktionssteuerung; Challenges of Energy Flexibility in Manufacturing Control*: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 109(1-2):29-33, 2014, ISSN:0947-0085, 2511-0896 (elektronisch)  
DOI:10.3139/104.111085 »
- [Rinza1992]** Rinza, P. und Schmitz, H.: *Nutzwert-Kosten-Analyse*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 1992. S. 11.
- [Schnei2019]** Schneider, T.: *Geschäftsmodelle für Stadtwerke als Aggregator von Virtuellen Kraftwerken – Entwicklung von Entscheidungskriterien und Mindestanforderungen*. Forschungs- und Entwicklungsarbeit, Hochschule Reutlingen, 2019.
- [Schu2015]** Schultz, Cedric; Keller, Fabian; Simon, Peter; Reinhart, Gunther; Dornmair, Rita; Wagner, Ulrich: *Wirtschaftlicher Einsatz von Energieflexibilität als Lösungsbaustein der Energiewende*, Zeitschr. f. wirtsch. Fabrikbetrieb, Heft 07-08/2015, S. 416-420, ISSN:0932-0482.
- [Stue2019]** Stueber, T., F. Heimgaertner, and M. Menth: *Day-Ahead Optimization of Production Schedules for Saving Electrical Energy Costs*. preprint, in Proceedings of the ACM International Conference on Future Energy Systems (ACM e-Energy), Phoenix, AZ, USA, June 2019.
- [Sutt2018]** Sutterer, A.: *Marktübersicht - Vermarkter von Stromflexibilitäten*. Hochschule Reutlingen, 2018.
- [Varli2018]** Varli, M.: *Optionen und Randbedingungen für die Flexibilisierungs-vermarktung von KMU in virtuellen Kraftwerken*. Hochschule Reutlingen, 2018.
- [VDE2019]** *Einsatz von Speichern benötigt Veränderungen*. [Online] 2019. [Zitat vom: 19. 02 2020.] <https://www.energie.de/et/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/einsatz-von-speichern-benoetigt-veraenderungen-2019419/>. VDE VERLAG GMBH. 2019
- [VDE2018]** *enera: Flexibilitätsmärkte für die netzdienliche Nutzung*. [Online] 2018. [Zitat vom: 19. 2 2020.] <https://www.energie.de/netzpraxis/news-detailansicht/nsctrl/detail/News/enera-flexibilitaetsmaerkte-fuer-die-netzdienliche-nutzung-2018233/>. VDE VERLAG GMBH. 2018
- [VDI5207]** VDI 5207 Blatt 1 Entwurf, *Energieflexible Fabrik, Grundlagen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2019
- [VDMA2015]**: *BluECoMpetence: Die Nachhaltigkeitsinitiative des Maschinen- und Anlagenbaus*. Broschüre des VDMA 2015
- [Wie2020]** Wieners, S.: *Stadtwerke als Betreiber von virtuellen Kraftwerken – Geschäftsmodellentwicklung unter Berücksichtigung der Herausforderungen, Chancen und Unternehmensauswirkungen*. Masterarbeit, Hochschule Reutlingen, 2020.
- [Wimm2014]** Wimmer, Damian; Heinemann, Christoph; Bauknecht, Dierk: *Die Auswirkung räumlich verteilter Windstromproduktion auf den Flexibilitätsbedarf im deutschen Stromsystem*, *Energie-wirtschaftliche Tagesfragen* \* Band 64 (2014) Heft 12, Seite 32-35, ISSN: 0720-6240
- [Wojc2018]** Wojcicki, Jeremi; Bianchi, Giacomo; Tolio, Tullio: *Hierarchical modelling framework for machine tool energy optimization*, *Journal of Cleaner Production* \* Band 204 (2018) Seite 1044-1059, ISSN: 0959-6526
- [Zol2018-1]** Zolezzi, A. M.: *Analyse der Intraday-Auktionmarkt in Deutschland*. Hochschule Reutlingen, 2018.
- [Zol2018-2]** Zolezzi, A. M.: *Analyse des Intradaymarkts im Hinblick auf Stromflexibilitätsvermarktung*. Hochschule Reutlingen, 2018.

# Anhänge



## Anhang 1: Umfrage zur Stromnutzung

## UMFRAGE ZUR STROMNUTZUNG

---

Sehr geehrte Damen und Herren,

haben Sie vielen Dank für die Teilnahme an der Umfrage zur Stromnutzung in Ihrem Unternehmen. Zunächst möchten wir sicherstellen, dass der Datenschutz gewahrt ist. Alle erhobenen Daten werden selbstverständlich anonymisiert bzw. pseudonymisiert. Darüber hinaus können Sie mit den folgenden Antworten die weitere Verarbeitung beeinflussen.

0.1 Ich stimme der Nennung meiner Organisation im Ergebnisbericht zu: JA  NEIN

Falls Sie mit JA geantwortet haben, können Sie ein Logo an **<ausgebende Stelle>** schicken.

0.2 Ich stimme zu, dass die erhobenen Daten mit den Daten anderer Teilnehmer aggregiert werden, z.B. für Branchenvergleiche: JA  NEIN

### Strukturdaten des Unternehmens

0.3 Die Angaben erfolgen für:  
Gesamtunternehmen  Standort  Abteilung

0.4 Welcher Branche ordnen Sie die betrachtete Einheit hauptsächlich zu?  
Dienstleistungen  Handel / Logistik  Metall / Elektro   
Chemie / Lebensmittel  Energie / Grundstoffe  Öffentliche Aufgaben  Sonstiges   
(Branche: .....)

0.5 Anzahl der Beschäftigten: < 50  50—250  251—1.000  > 1.000

### Genauigkeit der Daten

1.1 Die Angaben wurden überwiegend geschätzt   
Die Angaben wurden recherchiert (z.B. Buchhaltung / Versorger)   
Die Angaben wurden aus einem digitalen Management-System übernommen

### Freiwillige Angaben zur Person

1.2 Firmenanschrift: .....  
Name: .....  
Position: .....  
Telefon / Fax: .....  
Mail: .....

1.3 Dürfen wir Sie für Rückfragen kontaktieren? JA  NEIN



Mögliche Handlungsfelder

- 3.1 Welche Zertifikate besitzen Sie?  
 EMAS                       ISO 16247                       ISO 50001
- 3.2 Betreiben Sie ein(e)  
 Energiemanagement-System (EMS)    JA                       NEIN   
 Lastmanagement-System                      JA                       NEIN   
 Digitale Prozessplanung                      JA                       NEIN   
 Gebäudeleittechnik (GLT)                      JA                       NEIN
- 3.3 Betreiben Sie folgende Querschnittstechnologien?  
 Heizen mit elektrischen Systemen  
 (auch Wärmepumpen)                      JA                       NEIN   
 Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)  
 (BHKW oder Brennstoffzelle)                      JA                       NEIN   
 Lüftung / Klimatisierung                      JA                       NEIN   
 Druckluft / Lufttrocknung etc.                      JA                       NEIN
- 3.4 Betreiben Sie folgende Produktions-Technologien?  
 Spindelantriebe                      JA                       NEIN   
 Fördereinrichtungen, Stapler                      JA                       NEIN   
 Pumpen                      (nicht Haustechnik)                      JA                       NEIN   
 Mühlen, Mischer etc.                      JA                       NEIN   
 elektrische Prozesswärme                      JA                       NEIN   
 elektrochemische Prozesse                      JA                       NEIN   
 andere strombetriebene Technologien  
 (außer IT)                      JA                       NEIN   
 wenn JA, welche? .....
- 3.5 Laufen einzelne Prozesse / Anlagen nur zeitweise<sup>7</sup>?                      JA                       NEIN
- 3.6 Betreiben Sie Speicher (Wärme, Kälte, Druckluft, Batterie etc.)? JA                       NEIN

<sup>7</sup> Hier sind keine saisonalen Umstellungen gemeint, sondern Anlagen und Prozess, die im regulären Betrieb regelmäßig im Zustand AUS, STANDBY oder IDLE sind.







## Anhang 2: Technologiematrix

# Technologiematrix als Beratungs- und Erhebungs-Instrument

Tabelle 7: Liste der betrachteten Anlagen in den Musterbetrieben

Unternehmen	Abteilung/ Betriebsteil	Prozess	Anlage	Beschreibung
Franz Tress GmbH & Co. KG		Stromerzeugung	BHKW 1 & 2	Wärme- und Stromerzeugung
Franz Tress GmbH & Co. KG		Formenreinigung	Formenreinigung	Reinigung von Matrizen
Franz Tress GmbH & Co. KG		Nudellinie	Nudellinien	Herstellung der Teigwaren
Franz Tress GmbH & Co. KG		Eiaufschlag	Eiaufschlag	Eiaufschlag
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Materialgewinnung	Mobilbrecher	
Holcim (Süddeutschland) GmbH			Hammerprallmühle Hazemag	Mahlen von Einsatzstoffen
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Stromerzeugung	Dieselaggregat	Stromerzeugung
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Stromerzeugung	Dieselaggregat	Stromerzeugung
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Stromerzeugung	Dieselaggregat	Stromerzeugung
Holcim (Süddeutschland) GmbH			Hammerprallmühle MFL	Mahlen von Einsatzstoffen
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Stromerzeugung	Dampfturbinen 2 & 3	
Holcim (Süddeutschland) GmbH		BOS-Herstellung	Zementmühle 1	Herstellung von feinem gebranntem Ölschiefer (BOS).
Holcim (Süddeutschland) GmbH		BOS-Herstellung	Zementmühle 3	Herstellung von feinem gebranntem Ölschiefer (BOS).
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Zementpulver	Zementmühle 5	Herstellung von Zementpulver.
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Zementpulver	Zementmühle 6	Herstellung von Zementpulver.
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Materialgewinnung	Hammerbrecher	
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Transport	Seilbahn	Transport der Rohstoffe
Holcim (Süddeutschland) GmbH			Rollenmühle DOROL-2	
Holcim (Süddeutschland) GmbH			Rollenpressen	
Holcim (Süddeutschland) GmbH		Kohle mahlen	Kohlemühle	
Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanstechnik KG	Härtereie	Härten	Ofen groß (Härten, Glühen)	
Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanstechnik KG	Härtereie	Anlassen	Ofen klein (Anlassen)	
Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanstechnik KG	Tec-Screen	Galvanik	Galvanikanlage	
Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanstechnik KG	UG	Kälteerzeugung	Kälteerzeugung	
Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanstechnik KG	Ätzerei	Reinigung	Entfettungsanlage	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Gleitschleiferei	Reinigung	Waschanlage (MAFAC PALMA)	Teilereinigung vor Weiterverarbeitung
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lager	Automatisiertes Lager (LEAN LIFT)	Ein- und Auslagern von Teilen (Patemoster)
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Stromerzeugung	Notstromaggregat	Notstromerzeugung
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Kantine	Lüftung	Lüftung Kantine	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Werkstatt	Lüftung	Lüftung Werkstatt	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	WC	Lüftung	Lüftung WC	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	AV	Lüftung	Lüftung Arbeitsvorbereitung	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftung Außenluft	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Sozialbereiche	Lüftung	Lüftung Sozial	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Dreherei	Lüftung	Lüftung Dreherei	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Umluft 1-7	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftung Shed	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Sozialbereiche	Lüftung	Abluft Sozial	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Lager	Lüftung	Abluft Lager	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Umkleide	Lüftung	Lüftung Umkleide	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftung Bueschel	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	ULK Bueschel	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftungszentrale	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftung TB	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Heizung / Lüftung	Wandluftherhitzer	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Heizung / Lüftung	Deckenluftherhitzer	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Pumpen	Kaltwasserpumpe	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Kälteerzeugung	Klimakälte	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Kälteerzeugung	Kaltwasserpumpe	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Kälteerzeugung	Kältemaschine 1	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG		Lüftung	Lüftung	
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Energiezentrale	Heizung		Heizwärmeerzeugung
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Energiezentrale	Heizung		Heizwärmeerzeugung
Mayer & Cie. GmbH & Co. KG	Logistik	Transport	Elektrische Flurförderfahrzeuge	Stapler etc.
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Pumpwerk/ Wasserhebung	Entleerungspumpe	Pumpwerk
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Vorklärbecken	Frischschlammumpfen	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Belebungsbecken	Gebläse 3	Sicherstellung einer Zielkonzentration an Sauerstoff
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Schlammfäulung	Umwälzpumpen 1	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Schlammfäulung	Umwälzpumpen 2	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Schlammfäulung	Beschickungspumpe	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Stromerzeugung	BHKW 1	Wärme- und Stromerzeugung
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Stromerzeugung	BHKW 5	Wärme- und Stromerzeugung
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Belebungsbecken	Rücklaufschlammumpfen	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Schlammentwässerung	Membrankolbenpumpen	
Zweckverband Abwasserreinigung Balingen		Sand- und Fetttfang	Sandräumer	

Tabelle 8: Liste der Flexibilitäts-Kandidaten in den Musterbetrieben

Prozess	Anlage
Belebungsbecken	Gebläse
Belebungsbecken	Pumpe
Biologische Reinigung	Rücklaufschlammumpfen
Brauchwasserlager	Pumpe
Denitrifikation	Gebläse
Druckerhöhungsanlage	Pumpe
Energieerzeugung	BHKW
Energieerzeugung	BHKW
Feinrechen	Feinrechen
Lager	AKL
Lastmanagement	Lüftung
Lastmanagement	Kälteerzeugung
Lastmanagement	Pumpen
Lastmanagement	Elektrische Heizung
Mechanische Reinigung	Grobrechen
Metallbearbeitung	CNC-Anlagen
Nachklärbecken	Pumpe
Produktionsanlage	Eiaufschlag
Produktionsstraße	Nudellinien
Pufferspeicher/ Regenbecken	Pumpe
Pumpwerk	Hebepumpe
Pumpwerk	Spülpumpe
Sand und Fettfang	Drehkolbengebläse
Sand und Fettfang	Sandentnahme
SBR Demon Reaktor	Pumpe
Schlammbehandlung	Pumpe
Schlammbehandlung	Membrankolbenpumpe
Schlammeindicker	Pumpe
Schlammentwässerung	Kammerfiltepresse
Schlammfäulung	Fütterungspumpe
Schlammfäulung	Umwälzpumpen
Stromerzeugung	BHKW
Stromerzeugung	BHKW
Stromerzeugung	Notstromgenerator
Teilereinigung	Waschstraße
Teilereinigung	Formenreinigung
Thermische Metallbearbeitung	Härteofen
Thermische Metallbearbeitung	Durchlaufhärteofen
Transport mit Elektroantrieben	Flurförderfahrzeuge
Vorfluter	Turbine
Vorklärbecken	Pumpe

Tabelle 9: Die Technologiematrix als qualitatives Werkzeug für den Erstkontakt

Anlagentyp	Typische Leistung	verschiebbar	Zeitfenster	modulierbar	Skalenverhalten	Wichtigkeit im Regelbetrieb
BHKW	50kW – 1MW	ja	Minuten – Stunden	ja	linear	3
Galvanik	100kW	ja	Wochen – Monate	nein		3
Härteofen	10kW – 1MW	ja	Stunden	ja	linear	3
Kälteerzeugung	1kW -- 1MW	ja	Minuten -- Stunden	nein		2 -- 4
Medienpumpe	1kW -- 100kW	ja	Stunden	ja	3. Ordnung	4
Mühle, groß	1MW -- 10MW	ja	Stunden -- Tage	nein		3
Mühle, klein	1kW -- 100kW	ja	Stunden	nein		4
Notstrom	50kW -- 1MW	ja	Tage -- Wochen	ja	linear	1
Seilbahn	100kW	ja	Stunden	ja	linear	4
Ventilator	1kW -- 100kW	ja	Minuten -- Stunden	ja	3. Ordnung	3
Flurförderfahrzeuge/ Elektrotransport	10kW -- 100 kW	ja	Stunden	ja	linear	2 -- 4

Tabelle 10: Legende für Gewichtsstufen

Skala	Wichtigkeit der Anlage für den Prozess	Wichtigkeit des Prozess für die Produktion
1- unkritisch	bei Ausfall oder längerem nichtbetrieb der Anlage entstehen keine oder nur geringe Auswirkungen auf den Prozess	bei eingeschränktem Prozess entstehen nur geringe oder keine Auswirkungen auf die Produktion
2		
3- mittelkritisch	bei Ausfall oder längerem Nichtbetrieb der Anlage entstehen zeitnahe Auswirkungen auf den Prozess	bei eingeschränktem Prozess entstehen nur zeitnah Auswirkungen auf die Produktion
4		
5-sehr kritisch	Bei Ausfall oder Nichtbetrieb entstehen unmittelbar Auswirkungen auf den Prozess	bei eingeschränktem oder ausgefallenem Prozess entstehen unmittelbar gravierende Auswirkungen auf die Produktion

Tabelle 11: Kategorien für die detaillierte Datenerfassung

01	Unternehmen
02	Abteilung/ Betriebsteil
03	Prozess Anlage
04	Beschreibung
05	Installierte Leistung [kW]
06	Abrufleistung [kW]
07	Positive Abrufleistung [kW]
08	Negative Abrufleistung [kW]
09	Produktionsleistung
10	Spez. Energiebedarf
11	Auslastung / Vollbenutzungsstunden
12	Flexibilitätstyp
13	Aktuelle Betriebsweise
14	Wichtigkeit der Anlage für Prozess
15	Wichtigkeit des Prozess für Produktion
16	Taktung
17	Prozessdauer [h]
18	Prozesskette
19	Vorlaufzeit [sec]
20	Totzeit [sec]
21	Anstiegszeit [sec]
22	Aktivierungsgeschwindigkeit [sec]
23	Betriebsdauer min. [sec]
24	Ausschaltdauer min. [sec]
25	Ausschaltdauer max. [sec]
26	Betriebsdauer max. [sec]
27	Manuell
28	Automatisch
29	Zeitgesteuert
30	1/0
31	Leistungsstufen
32	Stufenlos
33	Personal nötig
34	Externe
35	Zeitlich
36	Sperrzeiten
37	Prozess
38	Anlage
39	Umwelt
40	Beschreibung
41	Vorgelagert
42	Nachgelagert
43	Speicherart
44	Speicherdauer
45	Kapazität vorgelagert
46	Kapazität nachgelagert
47	Speichergüte

## Technologiematrix als Beratungs- und Erhebungs-Instrument

48	Sollzustände Anlage
49	Sollzustände Speicher
50	Skalierung
51	Weitere Informationen
52	Vermarktung



## Anhang 3: Flexibilitätsmodellierung

# 1. Analyse von Produktionsanlagen der Metallbe- und -verarbeitung

## 1.1 Kurzbeschreibung

Produktionsanlagen der Metallbe- und -verarbeitung sind energieintensive Anlagen und tragen zu einem erheblichen Teil zur Wertschöpfung der industriellen Produktion in Deutschland bei. In diesem Bereich wurde die komplette Prozesskette von der Erschmelzung der Metalle bis hin zum fertigen Produkt analysiert. Bei einzelnen Prozessschritten wurde dann noch intensiver analysiert, in wie fern diese für die Nutzung von Flexibilität zum Netzausgleich eingesetzt werden können. Die Analyse beschränkt sich dabei auf typische Prozessketten des Urformens, Umformens und der Zerspanung.

## 1.2 Einführung metallische Produktionsprozesse

Produktionsprozesse metallischer Werkstoffe tragen durch die installierten Leistungen in den Produktionsanlagen und deren Anzahl erheblich zum gesamten industriellen Energieverbrauch bei. Metallische Werkstoffe sind dabei aufgrund der Werkstoffherzeugung und dessen Verarbeitung benötigten Leistungen interessant für die Betrachtung. Bei der Erzeugung metallischer Werkstoffe wird heute ein wesentlicher Anteil Recycling-Material verwendet. Weltweit beträgt dieser Anteil 37 %, in Deutschland sogar 45 %. Während bei der Erschmelzung von Roheisen häufig ein Hochofen eingesetzt wird, kann das Erschmelzen von Stahl aus Schrott auch in elektrisch betriebenen Öfen erfolgen. Diese sind aufgrund der installierten Leistungen von einigen MW heute schon häufig in ein Spitzenlastmanagement eingebunden. Ebenfalls hohen Leistungen im Bereich der Metallverarbeitung haben die beim Umformen vorgeschalteten Öfen zur Erwärmung der Bauteile vor dem Umformprozess. Die Leistungen derartiger Öfen beim Erschmelzen und Erwärmen liegen häufig im MW-Bereich. Nach der Erzeugung der Rohteile werden diese mit vielen spanenden Maschinen in die endgültige Form gebracht. Die bei spanenden Maschinen typischer Produktionsteile installierten Leistungen liegen häufig zwischen 5 – 120 kW (bei Großmaschinen auch darüber, bei Mikrobearbeitungsmaschinen auch darunter) [Fimm2018, Wojc2018].

Für die Nutzung von Flexibilität wurden diese Prozesse hinsichtlich der Struktur des Verbrauches, der zeitlichen Verteilung und der Struktur analysiert. Dabei wurden typische Prozesse mit beispielhaften Werkstücken betrachtet. Es erfolgte eine Klassifizierung der Prozesse, um die relevanten Bauteile und Abläufe zu identifizieren. Dabei wurden die folgenden Prozesse näher analysiert:

Prozesskette Schmieden mit Zerspanung  
Zerspanung auf Drehzentrum  
Zerspanung auf Bearbeitungszentrum  
Selektives Laser Sintern von Kunststoffbauteilen  
Prozesskette Blech für Automobilkarosserien

Bei der Analyse wurden bezüglich der Werkstücke folgende Unterscheidungen herangezogen:

- Größe und Masse der Werkstücke
- Großserienfertigung oder Einzelteile-/Kleinserienfertigung

Die Größe und Masse der Werkstücke sind relevant für das insgesamt verwendete Material. Damit steigen die Material- und Energieaufwendungen proportional zu der Masse des Materials bei der Erzeugung des Rohteils an.

Die Stückzahl der Bauteile hat erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Prozessketten. Bei der Herstellung von Einzelteilen, kleinen bis hin zu mittelgroßen Serien werden standardisierte Rohmaterialien (z. B. Stranggussabschnitte oder massive Blöcke) verwendet. Diese haben häufig ein relativ großes zu zerspanendes Materialvolumen. Dem gegenüber wird der Materialeinsatz bei der Großserienfertigung so optimiert, dass das bei der Bearbeitung zu zerspanende Volumen nur dem für die

Erzielung guter Werkstücke erforderlichen Mindestmaß entspricht. Die Einführung zusätzlicher Prozessschritte (z. B. das endkonturnahe Umformen) reduziert den Materialverbrauch entlang der gesamten Prozesskette. Dadurch ist der für die Erzeugung des Materials erforderliche Energieaufwand minimal. Auch wird durch das geringe zu zerspanende Materialvolumen bei der mechanischen Bearbeitung die Energie reduziert. Trotz des erforderlichen Mehraufwandes an Energie bei zusätzlichen Bearbeitungsschritten (z. B. Umformen) reduziert sich der Energieeinsatz deutlich [VDMA2015].

### 1.3 Detektion netzdienlicher Flexibilität

Für die Beeinflussung des Lastgangs ist zu betrachten, in wie fern Leistungen kontinuierlich oder intermittierend auftreten. Dabei geht es vor allem um nutzbare Leistungen ( $> xy$  kW) und zeitlichen Abschnitten von größer einigen Minuten (ab 10 – 15 Minuten-Abschnitten). Bei Produktionsanlagen gibt es insbesondere im Bereich der spanenden Fertigung eine Vielzahl von Operationen, die nur wenige Sekunden oder kürzer dauern (z. B. Beschleunigungs- und Bremsvorgänge, kurze Bearbeitungsoperationen). Diese Leistungen werden maschinenintern heute schon gepuffert. Dadurch findet eine kurzfristige Energiespeicherung und -abruf von geringen Energiemengen geschieht innerhalb der Maschinen mit Kapazitäten oder Schwungradspeichern. Zu unterscheiden sind dabei vor allem die Herstellung von Bauteilen in größeren Stückzahlen (z. B. typische PKW-Komponenten des Fahrwerks, der Karosserie und des Antriebsstranges sowie der unterstützenden Aggregate (z. B. Bremse, Lenkung), oder auch der Bereich Weiße Ware) und Bauteile, die in kleinere Stückzahlen gefertigt werden (z. B. Maschinenbau, Werkzeug- und Formenbau, Energietechnik (Windräder, Turbinen)). Während bei der Serienproduktion häufig kontinuierliche Produktionsprozesse über 16 oder 24 Stunden/d mit kurzen Zykluszeiten betrieben werden, können bei der Produktion kleiner Stückzahlen mit teilweise langen Bearbeitungsdauern teilweise Flexibilität (z. B. Auftragsreihenfolge, Startzeitpunkte) genutzt werden [Brug2018, Reinh2014a, Reinh2014b].

Die Analyse der Lastgangbeeinflussung wurde mit den folgenden Prozessen durchgeführt:

- Erschmelzen flüssigen Metalls mit Elektrolichtbogenöfen
- Blechverformung im Karosseriebau
- Zerspanung mit geometrisch definierter Schneide auf Bearbeitungs- / Drehzentrum
- Analyse unterschiedlicher Werkstücke
- Additive Fertigung mittels Selektivem Lasersintern

Im Rahmen des Projektes wurden die obenstehenden Verfahren sowie die Prozessketten unter Einsatz dieser Verfahren für die Einzelteil-/Kleinserien- sowie die Großserienfertigung von Bauteilen unterschiedlicher Gestalt analysiert. Daraus wurde der Energieverbrauch insgesamt und der zeitliche Verlauf der Leistung typischer Prozessketten abgeleitet und für Simulationszwecke modellmäßig abgebildet.

### 1.4 Produktionsketten metallischer Bauteile

Prozessketten metallischer Bauteile besitzen grundsätzlich die folgende Struktur:

- Erschmelzen des Metalls
- evtl. Umformen (wird bei Serien- und Großbauteilen angewandt)
- spanende Bearbeitung
- Fügen
- Teilweise auch Beschichten und Stoffeigenschaften ändern

Es sind nicht grundsätzlich alle Prozessschritte vorhanden. Teilweise sind die Verfahren heute leistungsfähig, dass andere Prozessschritte nicht erforderlich sind. Bei der Analyse des Energieverbrauchs bei der Produktion müssen immer alle Schritte der kompletten Prozesskette analysiert werden. Dabei ist die Erzeugung des Werkstoffes für die Rohprodukte, deren Herstellung durch Ur- und Umformen sowie die nachgelagerten, genauigkeitsbestimmenden Bearbeitungsverfahren und das anschließende Fügen zu betrachten. Das Beschichten und Ändern von Stoffeigenschaften ist bei me-

tallischen Komponenten häufig zwischengeschaltet zwischen den übrigen Bearbeitungsschritten (z. B. Härten von der Feinbearbeitung).

Die Betrachtung des Lastgangs beinhaltet zunächst eine Analyse der kontinuierlichen und intermittierenden Verbraucher einer Anlage ohne Prozess. Anschließend wird dann die prozessbedingte Leistung ermittelt. Dabei ist für die Beeinflussung des Lastgangs von Bedeutung, ob die Prozessschritte in den betrachteten Zeitabschnitten (min. 15 Minuten) variable Leistungen besitzen oder nicht. Kontinuierliche Serienprozesse mit kurzen Zykluszeiten pro Teil besitzen bei der spanenden Bearbeitung keine Flexibilität. Die Zykluszeiten pro Werkstück betragen häufig nur wenige Minuten bei Operationszeiten von durchschnittlich wenigen Sekunden. Werden diese Bauteile aber z. B. zum Härten in Chargen zusammengefasst, kann eine gewisse Flexibilität entstehen. Einzelbearbeitungen mit alternativer Reihenfolge können teilweise für flexible Lasten verwendet werden. Dabei ist jedoch zu betrachten, dass Einbußen in der Gesamtproduktivität oder eine Reduzierung der Lieferfähigkeit oder Ausbringung nicht hingenommen werden kann. Dies kann aber teilweise durch organisatorische Maßnahmen kompensiert werden.

## 1.5 Energetische Grundlagen Metallschmelzen

Das Erschmelzen von Metallen (insbesondere Stahl) werden hohe Energiemengen und damit Leistungen benötigt. Die für die Charakterisierung relevanten Kenngrößen beim Erschmelzen von Metallen sind:

- spezifische Wärmekapazität (temperaturabhängig)
- Schmelzenthalpie
- Phasenumwandlungsenthalpie

Für die Bestimmung der einzusetzenden Energie ist dann noch die Masse des Materials relevant.

$$E = m \cdot \int h(\vartheta) d\vartheta = V \cdot \rho \cdot \int h(\vartheta) d\vartheta$$

Die einzusetzende Leistung ist abhängig von der bei Metallen häufig relativ hohen Wärmeleitfähigkeit. Diese beträgt z. B. bei Öfen mit einer Kapazität von 8 Tonnen 6 MW. Mit dieser Leistung kann eine Ladung Material innerhalb von ca. 40 Minuten aufgeschmolzen werden.

Stahl:

Phasenumwandlung	753° C kfz => krz	64000 J/kg
Schmelzen	1367-1471° C	268000 J/kg
spez. Wärmekapazität		453 J/(kg K)

Durch die hohe Schmelztemperatur sind bei der Stahlerschmelzung große Energiemengen erforderlich. Die Leistung wird dabei durch die Wärmeleitung im Material und die elektrische Leistung begrenzt.

## 1.6 Energetische Analyse Additive Fertigung

Bei der additiven Fertigung metallischer Bauteile wird das Pulver häufig durch Gas- oder Wasserverdüsen aus dem flüssigen Zustand hergestellt. Alternativ kann dieses auch gemahlen werden. Bei dem Prozess mittels Gas- oder Wasserverdüsen ist aus energetischer Sicht ein zweifaches Erschmelzen des Metalls erforderlich:

- Erschmelzen vor der Gasverdüsung
- Erschmelzen des Materials während des Prozesses

Beim Laserschmelzen wird während der Herstellung nur das Material des Bauteils selber und der Supportstrukturen durch den Laserstrahl erschmolzen. Durch geschickte Gestaltung und Anordnung der Bauteile kann die Menge der Supportstrukturen minimiert werden. Die erschmolzene Materialmenge im Prozess beträgt dadurch nur wenig mehr als die Rohteilmasse. Durch die recht hohe Genauigkeit der Herstellung der Bauteile mittels Laserschmelzens (Toleranzen der Bauteile im Bereich 0,1 mm) und damit gut steuerbarer Aufmaße, lassen sich Bauteile mit geringem Mehrmaterial er-

zeugen. Das Verhältnis zwischen Support- und Bauteilmaterial ist sehr stark von Größe und Struktur der Bauteile abhängig. Verglichen mit umgeformten Bauteilen ist das Aufmaß beim Laserschmelzen geringer als beim Kaltumformen. Nachbearbeitet werden nur Funktionsflächen, während andere Oberflächen verwendungsfertig gestaltet werden können. Das beim Drucken nicht aufgeschmolzene Pulver kann nach Sieben wiederverwendet werden.

Energetisch betrachtet ist die gesamte erforderliche Energie beim additiven Laserschmelzen durch das zweifache Aufschmelzen deutlich höher als bei konventionellen Herstellungsverfahren. Die vorhandene Laserleistung beträgt bei heutigen Anlagen zwischen 200 W und 4x1 kW. Die am Anschluss beim Betrieb erforderliche Leistung beträgt ein Mehrfaches der Prozessleistung (ca. 10- – 20-facher Betrag der Laserleistung). Bei diesem Prozess ist der Wirkungsgrad deutlich geringer als in einem Schmelzofen. Dies ist auch durch die punktuelle Erwärmung und der dadurch hohe Wärmefluss in das umliegende Material bedingt. Die Baurate (aufgebautes Bauteilvolumen pro Zeit) liegt beim Selektiven Laserschmelzen typischerweise im Bereich von 10 - 100 cm<sup>3</sup>/h, beim Auftragspritzen beträgt diese bis zu 2500 cm<sup>3</sup>/h. Verglichen mit der Zerspanung sind diese Bauraten aber sehr gering. Dort können bei der Leistungszerlegung in Abhängigkeit der eingesetzten Maschine zwischen 200 – 1500 cm<sup>3</sup>/min bei Stahl und bis zu 20 dm<sup>3</sup>/min bei Aluminium zerspannt werden.

## 2. Grundsätze energetischer Analysen von Bearbeitungsprozessen

Bei der Analyse des Energieverbrauchs ist im Rahmen dieses Projektes eine Systematik entwickelt worden, die die Basis für die genaue Darstellung unterschiedlicher Verbrauchsarten der Werkzeugmaschinen erlaubt. Dabei wurden grundsätzlich die

- bearbeitungsunabhängigen und
- bearbeitungsabhängigen

Verbraucher der Maschine getrennt erfasst. Aus den bearbeitungsunabhängigen Verbrauchern ergibt sich der sogenannte Grundverbrauch, der nur von der Zeit abhängt. Dieser tritt auf, auch wenn auf der Maschine keine Bearbeitung durchgeführt wird. Der bearbeitungsabhängige Verbrauch der Werkzeugmaschinen wurde anschließend noch feiner analysiert. Dadurch ist eine maschinentyp-, technologie- und operationsspezifische Zuordnung der einzelnen Leistungsgänge möglich. Aus vorherigen Projekten flossen umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Schnittkraft-, Achskraft- und Leistungsmessungen mit in die Betrachtungen ein. Dadurch bestand die Möglichkeit, den Lastgang werkstückspezifisch über der Zeit abzubilden. Bei der Messung der Leistung an den Maschinen wurde ein mit 20 Hz arbeitendes Leistungsmessgerät verwendet. Dieses erfasst die Leistung der drei Phasen des Netzanschlusses in der Maschine. Bei der Erfassung der während der Bearbeitung auftretenden Leistung in den drei kartesischen Richtungen der Vorschubantriebe erfasst. Diese Methode ermittelt die Spindelleistung und die Leistung der Vorschubantriebe. Die Erfassung der Bearbeitungskräfte geschieht mit einer Samplingrate von bis zu 16 kHz. Damit sind selbst kleinste Schwankungen der Kräfte ermittelbar. Bei der energetischen Analyse sind diese nicht relevant.

Bei der konstruktiven Gestaltung von Produktionsanlagen gilt grundsätzlich das Prinzip der Reduzierung des Leistungsbedarfes durch den Einsatz effizienter Technologie und energiesparender Prinzipien. Dies wurde von zahlreichen Firmen in Kooperation mit dem VDMA in den letzten Jahre konsequent umgesetzt [VDMA2015]. Nach dieser Optimierung lassen sich die technologie- und/oder prozessbedingten Potenziale durch die Verschiebung / Reihenfolgeordnung teilweise als Flexibilität nutzen [Brug2018, Schu2015].

### 2.1 Energetische Analyse Drehzentrum

Ein im Labor der Hochschule Reutlingen vorhandenes Drehzentrum wurde nach der dargestellten Weise analysiert. Dabei wurde zunächst der Grundverbrauch der Maschine ermittelt. Die einzelnen Verbraucher der Maschine wurden sukzessive eingeschaltet und die Leistungsaufnahme gemessen.

## Grundsätze energetischer Analysen von Bearbeitungsprozessen

Die einzelnen Leistungen wurden mit den angegebenen Nennleistungen verglichen. Damit konnte mit guter Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Verbrauch der Aggregate in der Maschine und deren Peripherie ermittelt werden.

In der Maschine wurden nacheinander der Hauptschalter, die Steuerung, die Hydraulik, der nicht kontinuierlich laufende Späneförderer mit Hebepumpe und Niederdruck-Kühlschmierstoffpumpe eingeschaltet. Zur Ermittlung der Leistung der Niederdruck-Kühlschmierstoffpumpe (8 bar) wurde diese separat wurde diese anschließend wieder ausgeschaltet. Für bestimmte Bearbeitungs-Operationen (z. B. kleinen Bohrungen, Einstechdrehen) steht an der Maschine eine 20 bar Kühlschmierstoffpumpe zur Verfügung. Deren Leistung wurde als zusätzlicher Verbraucher untersucht. Beim Einschalten der Aggregate kann aufgrund der hohen Abtastrate eine erhöhte kurzzeitige Anlaufleistung beobachtet werden. Der Grundverbrauch ohne die nur bei der Bearbeitung laufenden Aggregate (Späneförderer, Hebepumpe, Kühlschmierstoffpumpe) beträgt bei dem untersuchten Drehzentrum 1765 W.

Darauf aufbauende Bearbeitungsversuche dienten der Verifikation der durch die Hauptspindel und Vorschubantriebe beanspruchten Leistungen. Dabei wurden unterschiedliche Bearbeitungsversuche mit verschiedenen Drehzahlen und Schnittleistungen durchgeführt. Es konnte eine gute Korrelation zwischen der aufgenommenen Schnittkraft (tangentiale drehmomenterzeugende Kraft) und der Spindelleistung ermittelt werden. Die Spindelleistung lag dabei durch die vorhandene Reibleistung immer etwas höher als die direkt ermittelte mechanische Schnittleistung.

Da die die nicht an der Vorschubbewegung beteiligten Vorschubantriebe keine Bewegungsleistung (Kraft \* Geschwindigkeit) leisten, wurde im Vorfeld bereits ein Modell auf der Basis des statischen Haltemomentes und der Drehmoment-Strom-Proportionalität zur Ermittlung der elektrischen Leistung erstellt. Die statischen Haltekräfte werden zum einen durch die Gewichtskraftbelastung und zum anderen durch die während der Bearbeitung auftretenden Kräfte erzeugt. Teilweise überlagern sich diese Kräfte und führen bei den gewichtskraftbelasteten Vorschubantrieben zu einer Resultierenden. Die Bearbeitungskräfte in den verschiedenen Richtungen lassen sich mit der Messtechnik erfassen.

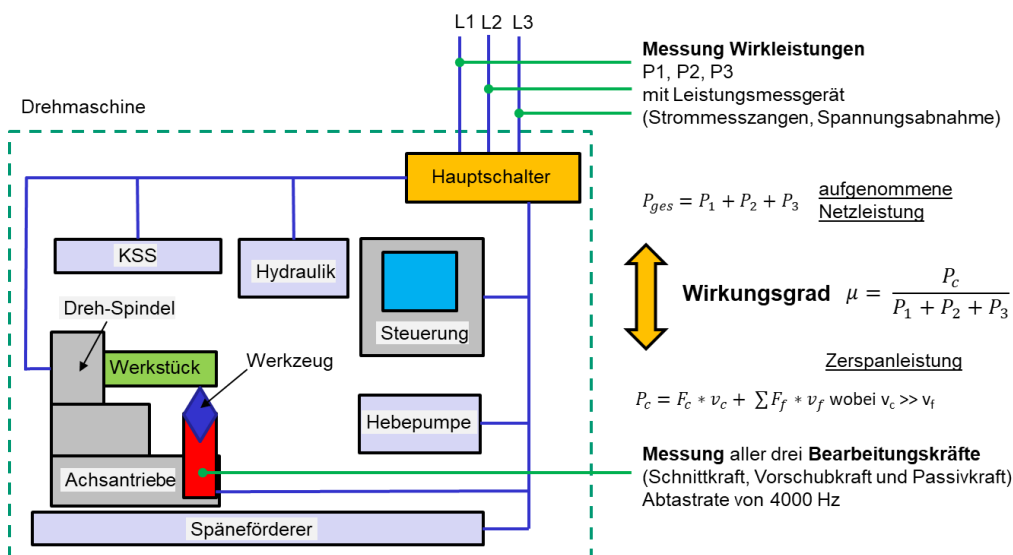
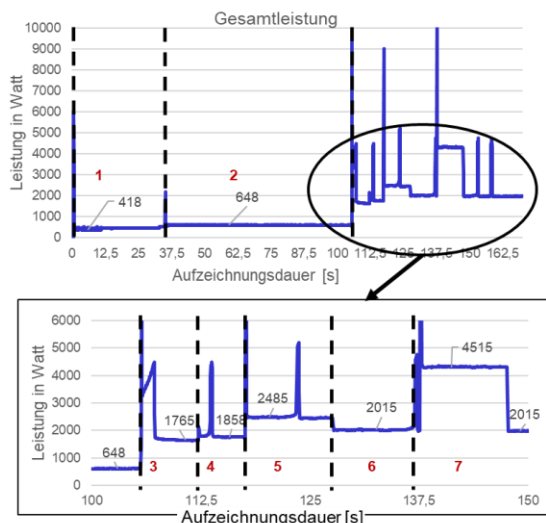


Abbildung 43: Verbraucher eines Drehzentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen]



Po s	Zustand	Komponenten	Leistung
1.	Hauptschalter	Standby-Betrieb	418 W
2.	Steuerung	Steuerung (PC,...)	230 W (gesamt 648 W)
3.	Hydraulik	Konstantpumpe; Lüfter;	3000 W 1117 W (gesamt 1765 W)
4.	Späneförderer	Getriebemotor;	250 W 93 W (gesamt 1858 W)
5.	KSS 8 bar + Hebepumpe	Tauchpumpe Typ TH426A590	2600 W 470W (gesamt 2485 W)
6.	Hebepumpe	TAA 140/200	550 W 157 W (gesamt 2015 W)
7.	KSS 20 bar + Hebepumpe	Tauchpumpe Typ TH426A590	2600 W 2300 W (gesamt 4315 W)

Abbildung 44: Grundverbrauchsanalyse der Maschinenaggregate eines Drehzentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen]

## 2.2 Energetische Analyse Bearbeitungszentrum

Nach der Erfassung der Leistung an der Drehmaschine wurde die Systematik auf ein Bearbeitungszentrum übertragen. Dabei wurde die Leistung der einzelnen Module analog dem Drehzentrum erfasst.

Die folgenden Komponenten wurden sequentiell eingeschaltet:

- Hauptschalter (Komponentengruppe 1 => Steuerung, Kühlung der Spindel ohne Leistung)
- Komponentengruppe 2 (Maschine über Steuerung einschalten)
- Komponentengruppe 3 (Türe schließen => Motoren)
- Lampen im Arbeitsraum
- Werkzeugwechsler (Handbetrieb, wechselt im normalen Betrieb nur bei stehenden Achsen)
- KSS-Pumpe
- Schaltschrank (ohne das Schaltschrank-Kühlaggregat)
- Kühlaggregat Schaltschrank ein

Die Vertikalachse des Bearbeitungszentrums besitzt keinen Gewichtsausgleich. Jedoch besitzt diese Achse eine Bremse, die aber nur dann aktiv ist, wenn die Achse nicht in Regelung ist. Während des geregelten Betriebes führt die Gewichtskraft dieser Achse zu einer statischen Belastung und damit Leistungsaufnahme. In Abhängigkeit der durchgeführten Bearbeitung überlagern sich vertikale Bearbeitungskräfte, die zu einer zusätzlichen be- oder entlastenden Wirkung führen. Es gibt Werkzeuge, die eine nach unten gerichtete Bearbeitungskraft erzeugen ebenso wie Werkzeuge, die nach oben drücken.

Auch auf dem Bearbeitungszentrum wurde für die Erfassung der Bearbeitungskräfte hochfrequent auflösende Kraftmesstechnik eingesetzt. Im Gegensatz zu dem Drehzentrum sind die Schnittkräfte bei der Fräsbearbeitung aber zeitlich durch die Eingriffs kinematik sehr stark schwankend. Die Höhe der Schnittkräfte und die Variation dieser ist dabei sehr von der Geometrie des eingesetzten Werkzeuges, den geometrischen Eingriffsbedingungen (z. B. Zustellung radial und axial, Eingriffsbogen und dessen Lage) abhängig. Die einzelnen Leistungen der unterschiedlichen Aggregate der Maschine sind in der folgenden Abbildung 45 dargestellt.

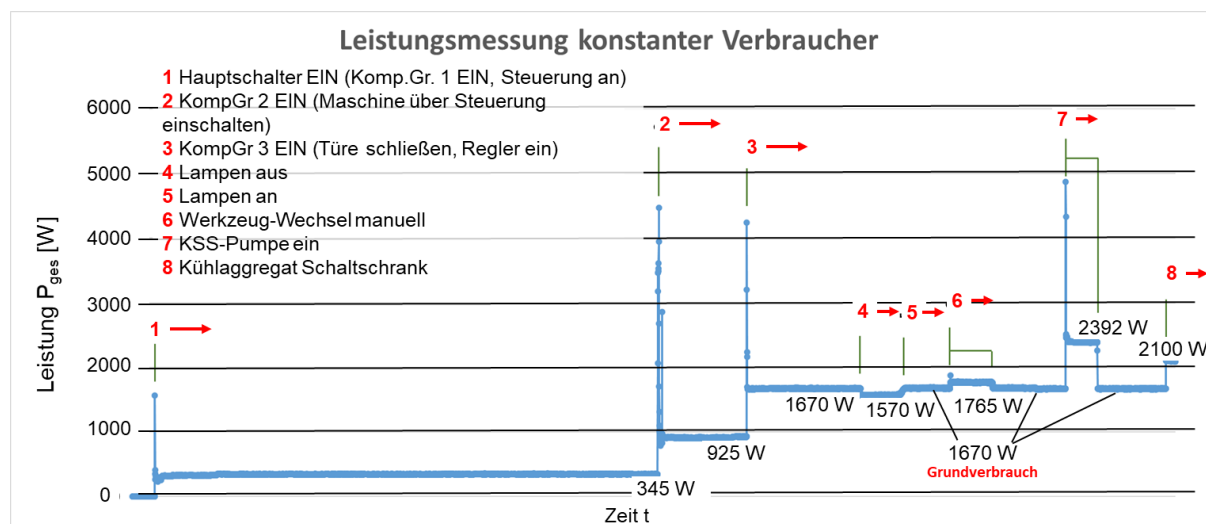


Abbildung 45: Grundverbrauchsanalyse der Maschinenaggregate eines Bearbeitungszentrums [Quelle: Hochschule Reutlingen]

## 2.3 Energetische Analyse von Maschinenantrieben

Bei der Analyse der Leistungsaufnahme von Werkzeugmaschinen ist die Gesamtleistung eine Zusammenstellung unterschiedlicher Leistungsanteile. Wie in den vergangenen Abschnitten dargestellt, setzt sich die Grundlast aus unterschiedlichen Anteilen zusammen.

$$P_{Grundlast} = \sum P_{i,Aggregat}$$

Während der Bearbeitung kommen noch die Anteile der Spindel und Vorschubantriebe sowie bearbeitungsspezifischer Aggregate (z. B. Kühlschmierstoffpumpen, Späneförderer) hinzu.

$$P_{Bearbeitung} = \sum (P_{i,Spindel} + P_{i,Vorschubantrieb} + P_{i,Peripherie})$$

Die Leistung während der Bearbeitung kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$P_{i,Spindel} = F_{c,i} * v_c = k_{c1.1} * b_i * h_0 * \left(\frac{h_i}{h_0}\right)^{1-m_c} * v_c$$

Dabei ist  $F_c$  die Schnittkraft, die durch werkstoff- und prozessabhängige Kenngrößen  $k_{c1.1}$ ,  $1-m_c$ ,  $b$  und  $h$  berechnet werden kann. In Abhängigkeit der Bearbeitung wird die Hauptspindleistung bei der Bearbeitung von Leichtmetallen teilweise zur Erzielung kurzer Hochlauf- und Bremszeiten oder bei der Guss- und Stahlbearbeitung zur Erzielung hoher Zerspanleistungen eingesetzt. Bei Leichtmetallen ist die während der Bearbeitung erforderliche Leistung außer bei Hochleistungsoperationen (z. B. bei der Herstellung von Flugzeugintegralbauteilen) relativ gering.

Die Leistung in den Vorschubantrieben ist von der konstanten Spannung der Antriebe sowie dem während der Bearbeitung bzw. dem Verfahren vorhandenen Drehmoment abhängig. Das Drehmoment resultiert aus den konstant vorhandenen Gewichtskräften bewegter Maschinenkomponenten, des während der Bearbeitung auftretenden Bearbeitungskräfte und den Beschleunigungs-/Bremskräften beim Verfahren der Maschinenachsen. Dadurch ist die in den Maschinenachsen umgesetzte Leistung direkt von der wirkenden Kraft der jeweiligen Achsrichtung abhängig.

Die auf den Vorschubantrieben wirkenden Kräfte beim Beschleunigen und Bremsen wirken bei den typischerweise vorhandenen technischen Daten an Werkzeugmaschinen nur kurzzeitig. Typische Werte für die Verfahrswege sind 0,2 – 2 m, Geschwindigkeiten 20 – 100 m/min und Beschleunigungen 2 – 20 m/s<sup>2</sup>. Daraus ergeben sich typische Beschleunigungs- und Bremszeiten von 0,05 – 0,25 s. In Abhängigkeit von der eingesetzten Antriebsvariante liegen die Leistungen dieser Vorschubantriebe zwischen 1 – 8 kW bei Servomotoren und bis zu 25 kW bei Linearmotoren. Bei Servoantrieben ist



die Leistung des Antriebs proportional der erforderlichen Stromaufnahme, die über die Drehmoment- bzw. Kraftkonstante (Nm/A bzw. N/A) von den konstant oder kurzzeitig wirkenden Drehmomenten bzw. Kräften abhängen.

$$P_{i,Vorschubantrieb} = \sum I_i(t) * U$$

## 2.4 Energetische Analyse unterschiedlicher Werkstücke

Nach der Erfassung des Grundverbrauchs der einzelnen Aggregate der Maschinen wurde die Verteilung der Leistung während der Bearbeitung bezüglich der Gesamtbelastung und der zeitlichen Verteilung ermittelt. Dabei wurden unterschiedliche Werkstücke auf dem Dreh- und dem Bearbeitungszentrum betrachtet und analysiert. Das Spektrum der Werkstücke reicht von sehr einfachen, kurzlaufenden Teilen bis zu Formenbauwerkstücken mit langen Bearbeitungszeiten. Zur Ermittlung von Flexibilitäten bei der Bearbeitung wurde schnell eine Eingrenzung auf Bauteile mit längeren Bearbeitungszeiten (>0,5 h) und erheblichen Schwankungen bei der Zerspanleistung vorgenommen. Bauteile mit kurzen Bearbeitungszeiten und konstanten, großen Stückzahlen (z. B. typische Automobilkomponenten) lassen sich damit nicht für Flexibilitäten nutzen.

Bei der Bearbeitung von Werkstücken wird die Leistungserspannung beim Schrappen mit möglichst hohem Materialabtrag und das Schlichten zur Erzielung guter Oberflächen unterschieden. Diese Unterscheidung ist beim Drehen und Fräsen möglich. Bei der Erzeugung von Bohrungen (Bohren), der Herstellung von Gewinden oder dem Reiben wird nur mit einem Satz Bearbeitungsparameter gearbeitet. Dort wird nicht zwischen Schrappen und Schlichten unterschieden.

Zur Bestimmung der während der Bearbeitung insgesamt benötigten Energie wird das Integral der Leistung der unterschiedlichen Bearbeitungsoperationen über der Zeit gebildet. Aus den erforderlichen Zerspankräften wird, zusammen mit der Maschinenkinematik und den vorhandenen Massen, Trägheiten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen die Bearbeitungsleistung ermittelt. Die Bearbeitungszeiten ergeben sich aus den Werkstückdaten und den technologischen Parametern. Die Grundleistung der Maschine wird jeweils addiert. Der Berechnung der Schnittleistung liegen jeweils die Spanquerschnitte, der Verlauf der Spanquerschnitte über der Zeit und die spezifische Schnittkraft zugrunde.

**Tabelle 12: Bearbeitungsoperationen mit Lastpotenzial [Quelle: Hochschule Reutlingen]**

	Schrappen	Schlichten
Drehen	X	X
Fräsen	X	X
Bohren		X
Reiben		X
Gewinden		X
Senken		X

Wichtige Bearbeitungsparameter:

- Schnittgeschwindigkeit
- Durchmesser
- Zustellung
- Vorschub
- Werkstoff / Schnittsteifigkeit
- Werkzeuggeometrie

Ein typischer Anwendungsfall mit ausgeprägter Schrapp- und Schlichtbearbeitung ist der Werkzeug- und Formenbau. Dort wird aus massiven Stahlblöcken ein Bauteil bearbeitet. Dabei werden häufig größere Volumina Material bearbeitet, wodurch eine relativ lange Schrappzeit mit hohen Zerspan-

leistungen resultiert. Beim darauffolgenden Schlichten ist die Bearbeitungszeit von der Oberfläche des Bauteils abhängig. Die Bearbeitungszeiten können bei diesen Operationen teilweise im Stundenbereich liegen.

Dem gegenüber betragen die einzelnen Bearbeitungszeiten der Serienproduktion von kleineren Bauteilen mit vielen Bearbeitungen häufig nur einige Sekunden. In der Serienproduktion werden die Werkstücke häufig durch Gießen und Umformen nahe der Endkontur geformt, so dass die zu zerspannenden Volumina gering sind. Dadurch sind die Bearbeitungszeiten mit hoher Leistungsaufnahme kurz gegenüber den anderen, funktionsgebenden Bearbeitungsoperationen. Kurzzeitige Leistungsspitzen können maschinenintern durch Speicher mit Kapazitäten von unter 1 kJ bis einige MJ. Hohe Werte der Energie treten dabei vor allem bei schnelldrehenden Hauptspindeleinheiten auf. Diese Energie kann durch maschineninterne Kondensatoren zum erheblichen Teil gespeichert werden. Dadurch lassen sich Brems- und Beschleunigungsvorgänge unmittelbar in der Maschine puffern. Im folgenden Bild sind zwei ähnliche Musterbauteile und die Leistungsverteilung über der Zeit dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass das Schruppen und Schlichten der Bauteile deutlich unterschiedliche Leistungen erfordert (23 kW gegenüber 5 kW). Durch die „Vernetzung“ und zeitliche Steuerung dieser Anlagen lässt sich der Lastgang beeinflussen. Ein manueller Eingriff während der Bearbeitung ist dabei nicht erforderlich. Auch die Programmierung und der Start der Bearbeitung erfolgen automatisiert.

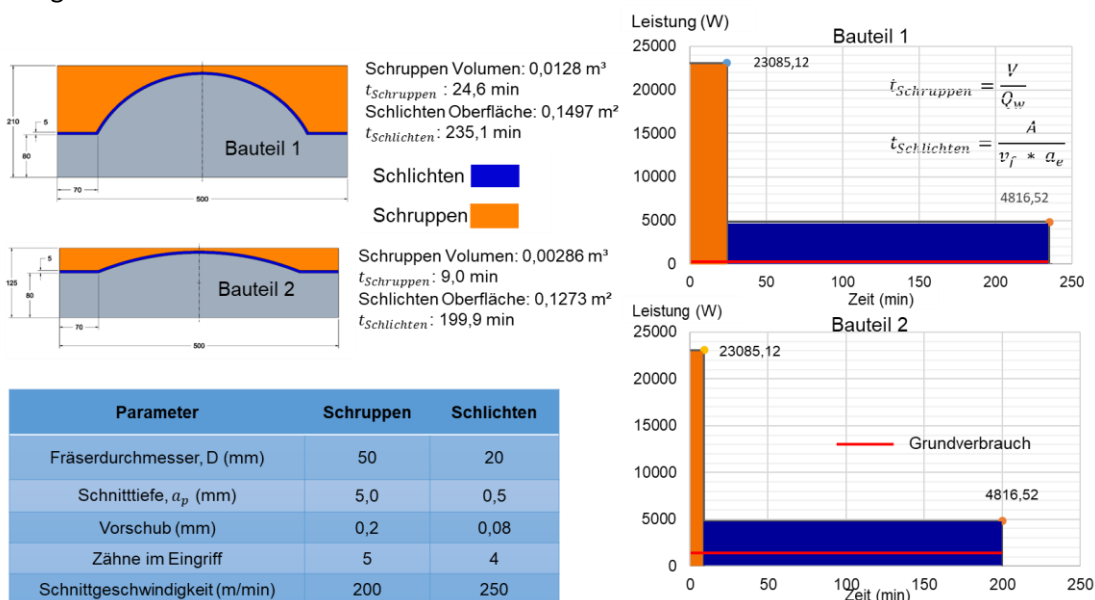


Abbildung 46: Leistungskennlinie unterschiedlicher Werkstücke [Quelle: Hochschule Reutlingen]

Die Unterschiede können sowohl zur Reduzierung der Spitzenleistung als auch zur Nutzung preislich interessanter Bereiche der Leistungsabnahme genutzt werden. Eine auf unterschiedliche Weise verteilte Bearbeitung von insgesamt 10 derartigen Maschinen zeigt die folgende Abbildung 47.

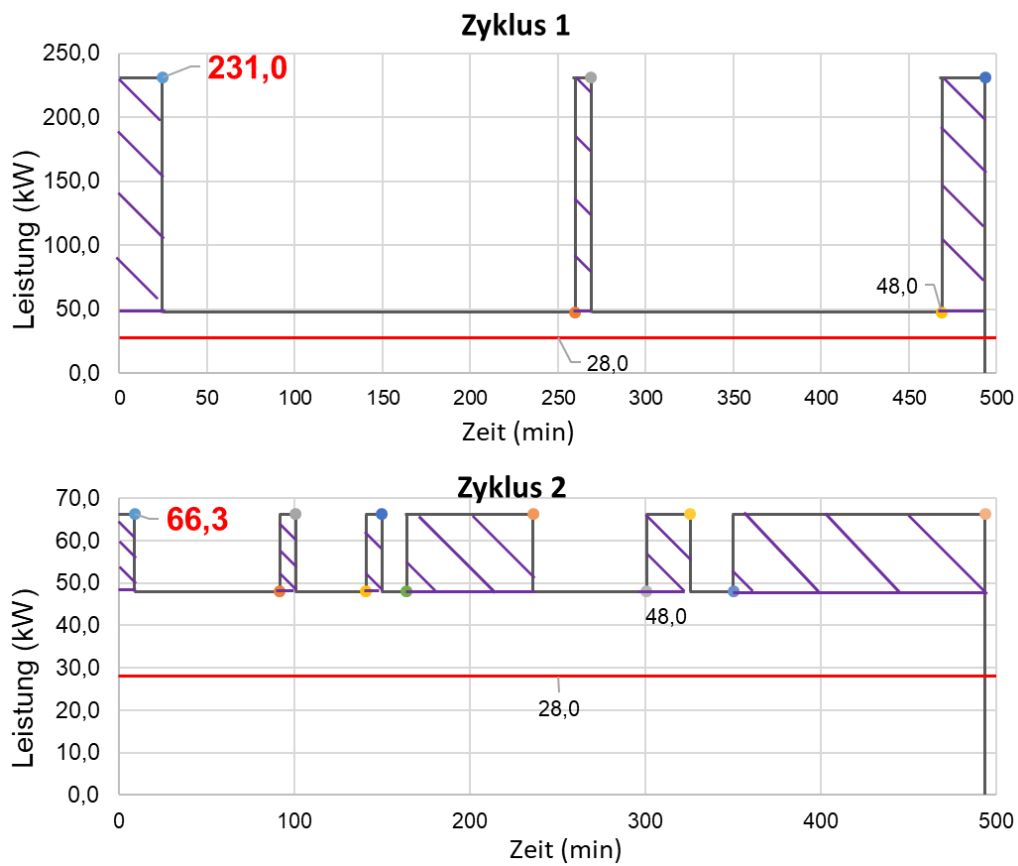


Abbildung 47: Leistungsgang bei zeitlicher Flexibilität mehrerer Produktionsanlagen [Quelle: Hochschule Reutlingen]



## Anhang 4: Leitfaden Prüfung und Eignung von Flexibilität

# Leitfaden

## **Vorwort:**

*Folgender Leitfaden entstand im Rahmen einer Masterarbeit, die in Kooperation mit der Fa. Patavo GmbH, AVAT Automation GmbH, gefördert durch die DBU, für das Kooperationsprojekt „VK KOOP“ durchgeführt wurde. Die Entwicklung von Geschäftsmodellen für die Teilnahme regelbarer Industrielasten von KMU an der Stromvermarktung über die Teilnahme in einem Virtuellen Kraftwerk unter wirtschaftlicher Betrachtung spiegelt die Hauptaufgabe wieder. Folgender Leitfaden soll die Unternehmen Stück für Stück bei der Überprüfung der Eignung ihrer Lasten als flexible Verbraucher begleiten. Hierfür werden die wichtigsten Kriterien, die zur Prüfung, ob eine regelbare Industrielast für die Vermarktung über ein Virtuelles Kraftwerk möglich ist, aufgelistet. Zusätzlich ist eine Checkliste bzw. Fragebogen im Leitfaden enthalten, die zwingend zu überprüfen ist. Letztlich sind gängige Quellen in einer Linkliste beigefügt.*

*Zum Aufbau ist zu sagen, dass für jedes wichtige Themengebiet eine kurze Erklärung beigefügt ist, die erklärt, weshalb dieses Themengebiet von Belang ist. Anschließend wird für jedes Thema ein Fragenkatalog erstellt, der für verschiedene Zielsetzungen eingesetzt wird. Zum einen sollen Potentiale realistisch eingegrenzt werden, zum anderen sollen wesentliche Kriterien wie z.B. Kostenfaktoren oder Interessenskonflikte dargelegt werden.*

**Analyse der Ist-Situation**

Für die Bestimmung der Ausgangssituation sollte ermittelt werden, welche stromintensiven Lasten im Unternehmen im Betrieb sind. Optimalerweise ist bereits ein Energiedatenmanagementsystem installiert, das zusätzliche Messdaten liefert. Von Belang für die einzelnen Prozesse sind die Daten:

- Installierte Leistung
- Anfahrtsgeschwindigkeit des Prozesses
- Messung des Lastganges der Last (z.B. wöchentlich, monatlich oder jährlich)
  - Je genauer die äquidistanten Messungen desto besser (sekündlich, stündlich etc.)
  - Ein- bzw. Ausschaltvorgänge abbilden
  - Jährlicher Verbrauch
  - Jährliche/Monatliche/Wöchentliche Benutzungsstunden
- Wichtigkeit des Prozesses

**Hintergrund:**

Für eine spätere Flexibilitätsbewertung sowie einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind eben genannte Daten essentiell. Es ist von großer Wichtigkeit, dass die rein installierte Leistung nicht ausreicht, um eine Bewertung durchzuführen. Die über einen Zeitraum angefallene Arbeit (Leistung\*Zeit), also der Lastgang, ist wesentlich aussagekräftiger.

**Checkliste 1 – Analyse der Ist-Situation**

**Häufige Fehler**

Die Installierte Leistung des Prozesses ist bekannt: <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Beachten der Unterschiede von real gemessenen Werten und angegebenen Werten
Eine äquidistante Leistungsmessung liegt vor: <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Wo ist der Zähler installiert? Werden Hilfsaggregate mitgemessen?
Der vorliegende Prozess ist für unser Unternehmen als <input type="checkbox"/> kritisch <input type="checkbox"/> unbedenklich zu sehen.	Hierbei sind Gesichtspunkte wie Wertschöpfung, Funktionalität weiterer Prozesse etc. mitinbegriffen.
Ein- und Ausschaltvorgänge sind aussagekräftig abbildbar: <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Stündliche Messung erlaubt keine Rückschlüsse auf sekundenschnelle Reaktionen
Es sind eindeutige Muster im Lastgang zu erkennen: <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Z.B. keine Produktion am Wochenende, höchste Last in der Mittagszeit etc.

**Hinweis: Falls Sie mehrheitlich die Haken bei „Nein“ gesetzt haben, heißt das nicht, dass die Last nicht geeignet ist. Es bedeutet vielmehr, dass eine genauere Prozessbetrachtung noch durchgeführt werden muss.**

### **Art der Flexibilität**

Für die Anwendung von DSM sind verschiedenen Formen möglich. Zu nennen sind die Lastverschiebung, die Lastreduktion, die Pufferung sowie Lasterhöhung.

Die analysierte Last eignet sich (generell) für folgende Arten von DSM (Mehrfachnennungen möglich):

- Lastverschiebung
- Lastreduktion
- Lasterhöhung
- Pufferung

### **Flexibilitätsbewertung**

Um die Höhe der Flexibilität für einen Zeitraum bestimmen zu können sind viele Rahmenbedingungen zu beachten. Die wichtigste Information stellt dabei die Auslastung des Prozesses, sprich wie viele Stunden pro Tag der Prozess am Laufen ist, dar. Die Zielsetzung, das Ausnutzen von der durch den Prozess bereitgestellten Flexibilität, kann anhand diesem Wert genauer eingegrenzt werden. „Ausnutzen von Flexibilität“ bedeutet in diesem Kontext, dass zu Zeiten niedriger Strombeschaffungspreise die Nachfrage erhöht werden soll und zu Zeiten hoher Strombeschaffungspreise die Nachfrage gesenkt werden soll. Die durch die Fragereihe 3.1 ermittelten Flexibilitätspotentiale beschreiben die möglichen Potentiale des Prozesses. Die Rede ist dabei noch von theoretischen Potentialen. Diese beinhalten weder technische Restriktionen noch wirtschaftliche Restriktionen wie z.B. die Anbindungskosten an ein Virtuelles Kraftwerk.

**Die folgenden Fragen dienen zur Abschätzung der tatsächlichen Flexibilitätspotentiale. Diese konkretisieren anhand der täglichen Auslastung die realen Potentiale. Diese Fragestellungen müssen für jeden einzelnen Prozess beantwortet werden.**



### Fragestellungen zur Eingrenzung der Flexibilitätspotentiale - Grundsätzliche Potentiale

1.) Die analysierte Last weist im Betrachtungszeitraum mögliche Verschiebungspotentiale auf:

Ja  Nein

Falls Frage 1) mit „Ja“ beantwortet wurde:

1.1 Hier bitte die tägliche Auslastung angeben (in Stunden): x h

2.) Die analysierte Last muss innerhalb fixer Zeiträume definitiv laufen:

Ja  Nein

Falls Frage 2) mit „Ja“ beantwortet wurde:

1.2 Hier bitte den Zeitraum eintragen, zu dem der Prozess definitiv laufen muss:

1.3 Gibt es Zeiträume, zu denen der Prozess definitiv nicht ausgeschaltet werden darf?

Ja, Zeitraum:  Nein

3.) Die analysierte Last muss, wenn sie eingeschaltet ist, für eine gewisse Mindestlaufzeit laufen:

Ja  Nein

Falls Frage 3) mit „Ja“ beantwortet wurde:

3.1 Wie lange ist die Mindestlaufzeit (in Stunden): x h

4.) Die analysierte Last ist während des Wochenendes in Betrieb:

Ja  Nein

Falls Frage 4) mit „Ja“ beantwortet wurde:

1.1 Weist die Anlage am Wochenende unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich Einsatzzeiten und Verbrauch auf? Bitte kurze Beschreibung, falls Auffälligkeiten beobachtbar sind.

---

---

5.) Weist der untersuchte Prozess eine Möglichkeit der Speicherung (z.B. Wärmespeicher) auf?

Ja  Nein

Falls Frage 5) mit „Ja“ beantwortet wurde:

5.1 Wie groß ist der vorhandene Speicher (wie viele Stunden Arbeit (kWh) passen hinein)?

Antwort in h oder kWh:

### **Fragestellungen zur Eingrenzung der Flexibilitätspotentiale - Technische und wirtschaftliche Restriktionen**

Folgende Fragereihe berücksichtigt relevante Restriktionen zur genaueren Einschätzung der Potentiale. Insbesondere technische und wirtschaftliche Hemmnisse werden untersucht. Die wirtschaftlichen Restriktionen grenzen nicht die technisch möglichen Potentiale ein. Vielmehr schränken sie diese ein, die nicht in einem wirtschaftlich vertretbaren Rahmen durchführbar sind. Es ist zu beachten, dass einige Kostenfaktoren prozessspezifisch sind. Diese werden im Fragebogen behandelt. Die Kosten, die nicht veränderlich sind, werden nicht im Fragebogen abgefragt, sind aber folgend aufgelistet.

#### **Nicht beeinflussbare Kostenfaktoren:**

- Anbindungskosten an ein Virtuelles Kraftwerk (beinhaltet Standortpauschale und Hardware bei den Next Kraftwerken für circa 3.500€)
- Geschäftsmodell des Aggregator bzw. Vermarkter (Profit-Sharing-Model, d.h. der Aggregator erzielt prozentuale Gewinne anhand der Erlöse, die an den jeweiligen Märkten erzielt werden)
- *Optional: Unternehmen, das die Lastgänge misst und Potentiale berechnet, um Eignung der Last zu überprüfen*
- *Direkter Börsenzugang 1x25.000€ +10.000€ jährlich → entfällt durch Vermarkter. Nur bei eigener Vermarktung ohne Zwischenakteur von Interesse*

### Kostenfaktor 1 – Wartung, Verschleiß und Reparatur

1. Die analysierte Last kann beliebig oft ohne zusätzlichen Wartungsaufwand Ein- bzw. Ausgeschaltet werden.

Ja  Nein

Falls Frage 1) mit „Nein“ beantwortet wurde:

1.1 Ab welcher Zykluszahl kann mit erhöhten Aufwendungen gerechnet werden? (Bitte kurze Beschreibung, falls Auffälligkeiten beobachtbar sind.)

1.2 Wie hoch sind die Aufwendungen für zusätzliche Wartungen? Höhe der Aufwendungen in € pro Stunde: x €/h

1.3 Kann die erhöhte Zykluszahl zu einer schlechteren Performance und zu höheren Ausfallzeiten führen?  Ja  Nein

1.4 Sind erhöhte Reparaturzahlungen für die Maschine zu erwarten?  Ja, Höhe in €:  Nein

### Kostenfaktor 2 – Verluste durch gekoppelte Prozesse

2. Beeinträchtigen die Fahrpläne des beeinträchtigten Prozesses A die Fahrpläne des Prozesses B, C, D etc.? (Beispiel: Prozess B braucht für die Produktion Teile von Prozess A)

Ja  Nein

Falls Frage 2) mit „Ja“ beantwortet wurde:

1.1 Können die Kuppelprozesse so betrieben werden, dass keine Engpässe sowie Produktionsreduktionen entstehen?  Ja  Nein

Wenn, ja: Sind Zwischenspeicher  Ja  Nein oder intelligente Fahrpläne  Ja  Nein möglich?

1.2 Kann Ausschuss entstehen, da Materialien aus dem Vorprozess nicht verfügbar sind?

Ja  Nein

1.3 Wie hoch sind die finanziellen Ausfälle<sup>8</sup> durch Kuppelprozesse? Höhe der Ausfälle in € pro Stunde: x €/h

### Kostenfaktor 3 – Verluste der Reduzierung von Netznutzungsentgelten

1. Das analysierte Unternehmen profitiert von der Reduzierung von Netznutzungsentgelten nach der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) §19 (2).

Ja  Nein

Falls Frage 1) mit „Ja“ beantwortet wurde:

1.1 Wie hoch sind die Einsparungen in Prozent?  70%  80%  90%

1.2 Wie hoch ist die jährliche Benutzungstundenzahl? (Gesamtverbrauch im Verhältnis zur höchsten Jahreslast) Benutzungstunden in Stunden: x h

1.3 Eine Verschiebung der Last des analysierten Prozesses kann zu Problemen für die Reduktion von Netznutzungsentgelten führen.  Ja  Nein

### Kostenfaktor 4 – Erhöhter Mitarbeiteraufwand

1.) Die analysierte Last muss von fachkundigem Personal überwacht werden:

Ja  Nein

Falls Frage 1) mit „Ja“ beantwortet wurde:

<sup>8</sup> Z.B. das Nichterfüllen von Aufträgen, Ausschuss oder Kundenverluste durch mangelnde Qualität der Produkte.

## Leitfaden Prüfung und Eignung von Flexibilität

1.1 Für einen Betrieb außerhalb der ursprünglichen Arbeitszeit des Prozesses kann eine Flexibilisierung zu Mehrmitarbeiteraufwand durch zusätzliche Schichten führen:

Ja  Nein

2.2 Für einen Betrieb außerhalb der ursprünglichen Arbeitszeit des Prozesses kann eine Flexibilisierung zu Mehrmitarbeiteraufwand durch Umschulen führen:

Ja  Nein

2.3 Für einen Betrieb außerhalb der ursprünglichen Arbeitszeit des Prozesses kann eine Flexibilisierung zur erschwerten Einhaltung von Prozesskennzahlen führen:

Ja  Nein

### Technische Restriktion 1 – keine Erfüllung von Präqualifikationsanforderungen

1.) Die analysierte Last ist reproduzierbar schnell ein- bzw. ausschaltbar:

Ja, in circa x Sekunden  Nein, in circa x Sekunden

2.) Die analysierte Last lässt sich in ihrer Leistung steuern:

Ja  Nein

Falls Frage 2) mit „Ja“ beantwortet wurde:

2.1 Wie hoch ist die Leistung, um die die Last im Betrieb gedrosselt/erhöht werden kann? Wie lange sind dafür die Zykluszeiten?

Höhe der Leistungsdrosselung in MW:

Zeit der Aktivierung in Sekunden:

Höhe der Leistungserhöhung in MW:

Zeit der Aktivierung in Sekunden:

2.2 Können sich durch den Betrieb, der nicht am optimalen Betriebspunkt durchgeführt wird, höhere Primärenergiekosten ergeben (Höherer Verbrauch, gesenkte Effizienz etc.)?

Ja, mit geschätzten Kosten von x €/kWh  Nein

### Rechtliche Rahmenbedingungen

Ein Zusammenschluss von mehreren teilnehmenden Akteuren bedeutet, dass Verträge benötigt werden, die die wesentlichen Rahmenbedingungen festlegen. Hauptsächlich müssen dabei finanzielle Themen geklärt werden sowie die Pflichten, die jeder Teilnehmer zu erfüllen hat. Für die Nicht-Erfüllung der Pflichten muss vertraglich geregelt werden, inwieweit dieser Vertragsbruch geahndet werden muss. Die Auflistung dieser Vertragsgegenstände ist nicht vollständig, nicht bindend sowie rechtlich korrekt definiert (der Autor dieses Leitfadens ist kein Jurist). Vielmehr soll sie einen Überblick geben, welche grundsätzlichen Themen in Betracht gezogen werden sollten.

- Vertraglich definierte Pflichten: Pflichten der beteiligten Vertragspartner klar und sachlich formulieren.

Z.B.: Für den Aggregator wird festgelegt wie die Vermarktung abzulaufen hat, wobei für die Industrieunternehmen definiert wird bis wann diese ihre Flexibilität bekanntgeben müssen (Fahrplan). Die zugesagte Flexibilität muss zu besagten Zeitkorridoren geliefert werden.

- Vertrag zwischen Aggregator und Industrieunternehmen über finanzielle Abrechnung z.B. Profit-Sharing-Model
  - Zahlungsmodalitäten (wöchentlich, monatlich)
  - Zahlungsfristen
- Geheimhaltungsvertrag z.B., keine Auskunft des Aggregator an Konkurrenzunternehmen über Höhe der Flexibilität der einzelnen Unternehmen
- Laufzeit und Vertragspartner

Im Vertrag muss eindeutig festgehalten sein, welche Vertragspartner beteiligt sind. Dabei ist zwingend ein zeitlicher Rahmen der Vertragslaufzeit zu definieren.

- Haftung:

Im Rahmen eines Virtuellen Kraftwerkes muss geklärt werden, wer dafür haften muss, falls die angemeldete Stromnachfrage bzw. das angemeldete Stromangebot nicht eingehalten werden kann. Dabei ist zu differenzieren, ob der Aggregator oder der Bereitsteller der flexiblen Last den Fehler begangen hat.

Denkbare Szenarien:

- Industrielast geht kurz vor Bereitstellung kaputt
- Fehlerhafte Anmeldung von Flexibilität, obwohl diese nicht verfügbar ist
- Aggregator handelt und vergisst dabei einige Lasten zu handeln
- Kommunikationsprobleme über Steuerbox lässt keine Anmeldung von Flexibilität zu
- Eskalationsmanagement bei Verstoß gegen die Vertragspflichten z.B. Mahnungen, Strafzahlungen, Ausschluss aus VK etc.
- Wartung- und Instandhaltungsverträge für Steuerbox:

Vertrag zwischen Industrieunternehmen und Bereitsteller der Steuerbox und Optimierungsalgorithmus.

### Sonderthemen

Unter der Rubrik Sonderthemen sind wichtige Themen zusammengefasst, die nicht direkt den bisherigen Themen zugeordnet werden konnten, aber dennoch zu beachten sind.

**Maxima-Verteilung:** Der etwas sperrige Begriff „Maxima-Verteilung“ bedeutet in diesem Kontext, dass das Maximum des Aggregator nicht immer mit den Maxima der weiteren Teilnehmer korreliert. Ähnlich wie in der Analysis-Rechnung kann die Optimierung dazu führen, dass lokale sowie globale Maxima entstehen.

Es folgt: **Die im Vorfeld errechneten potentiellen Erlöse können geringer ausfallen, da das Optimum des Prozesses nicht das Optimum des gesamten Verbundes darstellt!**

1.) *Das beteiligte Unternehmen kann damit umgehen, dass nach dem Optimum des Verbundes und nicht des eigenen Prozesses gehandelt wird.*

Ja

Nein

**Steuerhoheit:** Steuerhoheit im Rahmen des DSM bedeutet, trotz der Bereitstellung der Flexibilität des Prozesses, die letzte Instanz zu sein, die das tatsächliche Signal gibt. D.h., dass der Aggregator die Anlagen nicht fernsteuern kann, um die beteiligten Unternehmen bei Nicht-Lieferung zur Aktivierung zu zwingen.

2.) *Das beteiligte Unternehmen gibt die Steuerhoheit auf und übergibt für den Flexibilitätszeitraum die Steuerhoheit an den Aggregator:*

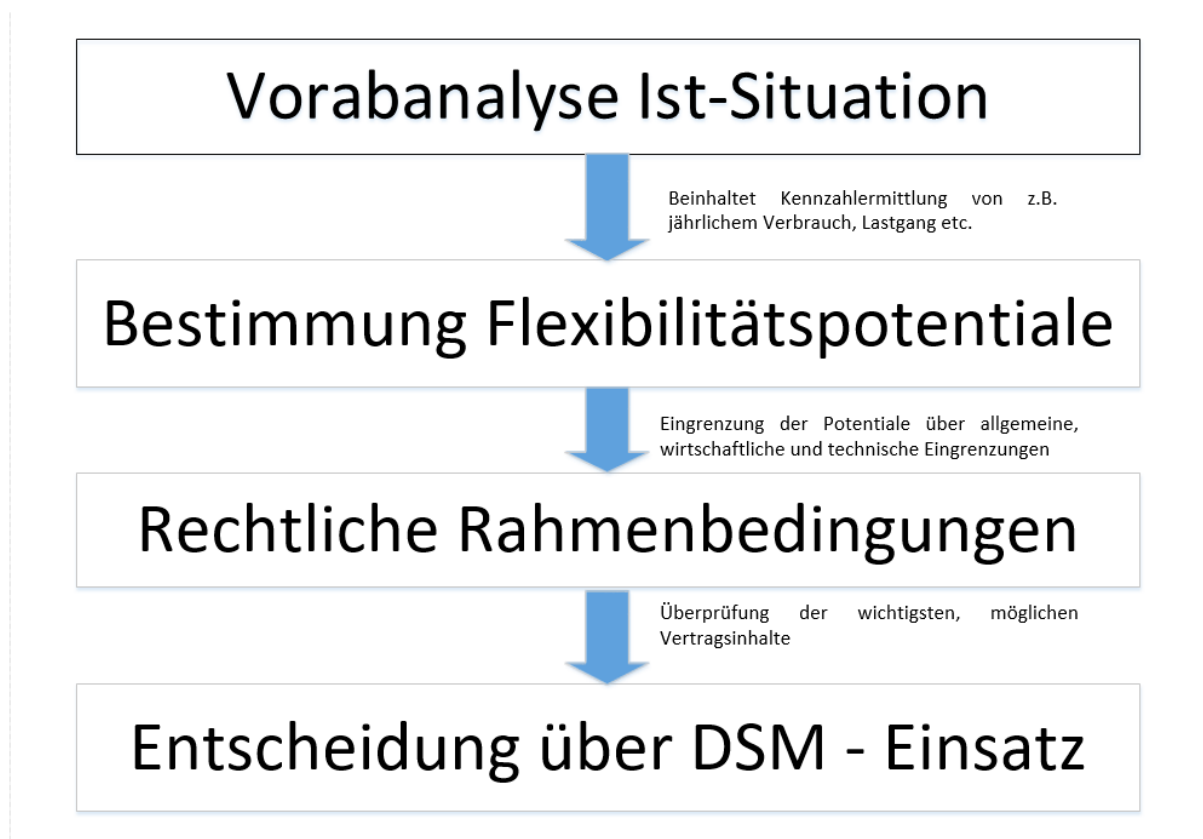
Ja

Nein

### Zusammenfassung

Folgende zwei Abbildungen stellen die behandelten Inhalte grafisch übersichtlich dar.

Abbildung 48: Auflistung der wesentlichen Schritte zur Prüfung der Eignung von ausgewählten Industrielasten für den Einsatz von DSM in einem Virtuellen Kraftwerk



### Entscheidungsbaum

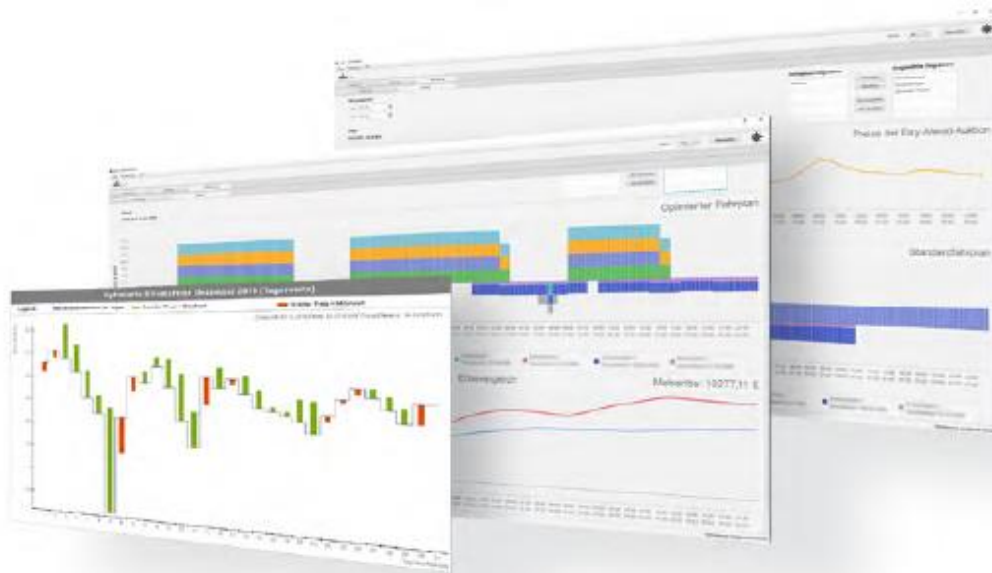
#### Resümee

Nachdem die wichtigsten Punkte durch diesen Leitfaden abgedeckt worden sind, gilt es schlussendlich nur noch zu entscheiden, ob einer bzw. mehrere Industrielasten zur Flexibilitätsvermarktung in einem Virtuellen Kraftwerk eingesetzt werden sollen. Hierbei spielen Risikoaffinität, Renditeerwartungen und weitere strategische Aspekte eine Rolle. Diese Kriterien sind für jedes Unternehmen unterschiedlich und können nicht vereinfacht dargestellt werden.





## Anhang 5: Produktdatenblatt SE<sup>2</sup>OPTIMIZER



## SE<sup>2</sup>OPTIMIZER

Flexibilität ist die neue Ware der Energiewirtschaft. Der Sprung zum virtuellen Kraftwerk, um Produktions- und Energieerzeugungsanlagen deutlich wirtschaftlicher zu betreiben, ist eine unternehmerische Entscheidung, die man nicht mal eben so aus dem Bauch heraus trifft.

Falls Sie in diesem Schritt die Gewissheit suchen, bei der Realisierung kompetent begleitet zu werden, dann haben wir interessanten Gesprächsstoff und die passende Lösung.

Mit dem SE<sup>2</sup>OPTIMIZER werden für Erzeugungs- und Industrieanlagen gesamt-kostenoptimierte Fahrpläne erstellt. Diese können dann einem beliebigen Vermarkter zum Handel an den Energiemärkten bereitgestellt werden.

Im ersten Schritt wird die gesamte Anlage modelliert. Die möglichen Flexibilitäten werden mit dem Anlagenbetreiber, unter Berücksichtigung vorhandener Restriktionen, identifiziert.

Neben den Energiekosten werden weitere Kosten, wie z.B. Personal- und Prozesskosten, in die Optimierung einbezogen. Der Algorithmus ermittelt für den vorgegebenen Zeitraum die wirtschaftlich beste Fahrweise sektorübergreifend aus dem Zusammenspiel von Erzeugern, Speichern und Verbrauchern.

Bevor der Fahrplan in die Vermarktung gegeben wird, kann der Verantwortliche diesen bestätigen oder mittels erneutem Optimierungsdurchlauf einen veränderten Soll-Fahrplan generieren.

Ob eigenstrom- oder strompreisoptimierter Anlagenbetrieb - ein Wechsel ist jederzeit möglich - die Hoheit hat stets der Betreiber.

### HIGHLIGHTS

- KI-basiertes Modul für Bedarfsprognosen
- Eigenstrom- und strompreis-optimierter Betrieb möglich
- Anlagenhoheit bleibt zu jeder Zeit beim Betreiber
- Sensible Daten bleiben stets auf der Anlage
- Der Vermarkter ist frei wählbar
- Modular erweiterbar zur kompletten VK-Lösung



## WIRTSCHAFTLICH, GANZHEITLICH UND ERWEITERBAR: ANLAGENOPTIMIERUNG DIREKT VOR ORT

Zur kostensenkenden und erlössteigernden Anlagenfahrweise steht mit dem SE<sup>2</sup>OPTIMIZER eine Demand Side Management-Lösung bereit, die den Optimierungsprozess aller Prosumer von Energieerzeugungs- und Produktionsanlagen selbständig durchgeführt und so ungenutzte Flexibilitäten wirtschaftlich nutzbar macht.

Die intelligenten SE<sup>2</sup>OPTIMIZER werden dazu vor Ort auf den Anlagen installiert, erstellen lokal die Sollfahrpläne anhand der prognostizierten Börsenpreise und können zur anschließenden Vermarktung an nahezu jede Handelsplattform angebunden werden. Die Anlagenhoheit sowie alle kritischen Betriebsdaten der Anlagen bleiben, aufgrund der örtlich durchgeführten Optimierung, stets beim Betreiber.

### ENERGIEVERSORGER UND -PRODUZENTEN

Netzbetreiber und Energieversorger sind in hohem Maß auf flexible Speichermöglichkeiten, Lastmanagement und Leistungsreserven angewiesen, um das Stromnetz ausgleichen zu können. Eine gezieltere Fahrweise trägt zum besseren Ausgleich zwischen Stromverbrauch und -erzeugung bei. Gerade in der Wärmeversorgung bietet es sich an, Strom verbrauchende Aggregate mit Stromerzeugern zu einem virtuellen Stromspeicher zu kombinieren. Wie im prognosebasierten Erzeugungs- und Lastmanagement werden die Aggregate dann nach Spotmarktpreisen optimiert. Fernwärmenetze und Objekte mit ganzjährigem Wärmebedarf, wie zum Beispiel Hallenbäder oder Kliniken, sind besonders geeignet.

### INDUSTRIEANLAGEN

Die Flexibilität des SE<sup>2</sup>OPTIMIZER zeigt sich auch in der Integrierbarkeit der verschiedenen Anlagentypen: ob thermische Prozesse (Heizungen, Brennöfen, etc.), mechanische Prozesse mit Speichern oder Lagern (Mühlen, Spritzgussmaschinen etc.) oder verfahrenstechnische Prozesse (chemische Umwandlungsprozesse, Vergärungsanlagen, etc.) Je nach gewünschtem Automatisierungsgrad können dafür zahlreiche Schnittstellen (IO, Modbus, Profibus, etc.) zur Anlagensteuerung verwendet werden. Viele Anlagen, auch bereits bestehende, sind mit wenig Aufwand so zeitlich flexibel einsetzbar und können problemlos zur Energiekosteneffizienz herangezogen werden - die Produktionsziele gehen stets vor.

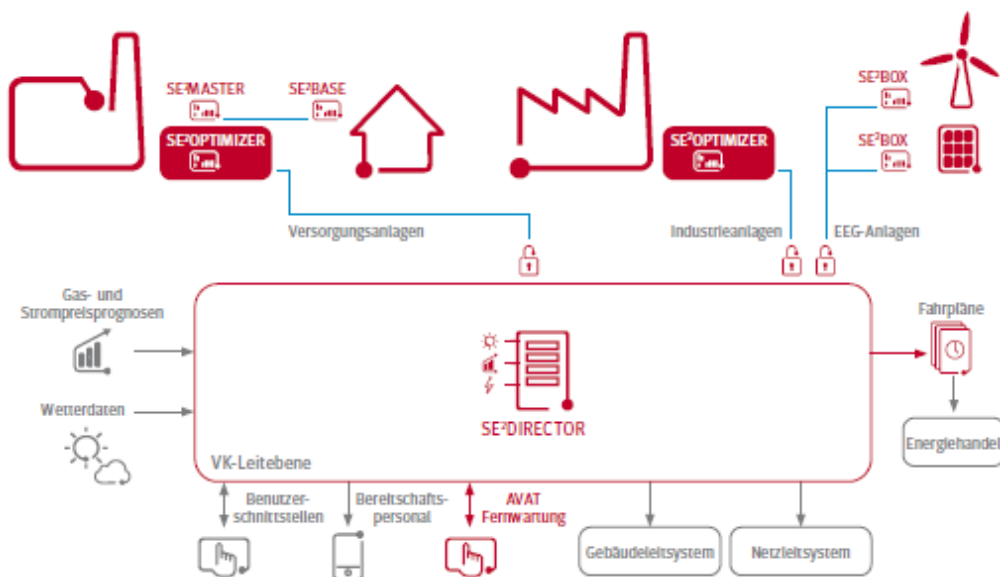
## ERST OPTIMIEREN - DANN PROFITIEREN

Eigentlich ist die Anlagenoptimierung eine einfache Sache. Mit Überschüssen werden Mehrerlöse in Zeiten hoher Strompreise erreicht oder in Zeiten günstiger Strompreise geringere Verbrauchskosten erzielt. Eigentlich. Aber wann ist der richtige Zeitpunkt für welche der beiden Aktionen? Wann können die Anlagen das leisten, ohne die eigentlichen Aufgaben zu vernachlässigen? Und wie passt man den Fahrplan vorausschauend darauf an? Die Lösung heißt: intelligent optimieren und langfristig profitieren.

- Beliebige Kombinationen von Energiespeichern (z. B. Gasspeicher, Wärmespeicher, Materialspeicher, Wasserhochbehälter, Batterie etc.) mit Erzeugern und Verbrauchern (z. B. BHKW, Kessel, Wärmepumpen, PV, Mühlen, Pumpen, Gebläse, Kaltmaschinen etc.)
- Börsenpreis- und eigenstromoptimierter Wechselbetrieb unabhängig vom Medium (Strom, Gas, Wärme, Kälte etc.)
- Unabhängig einsetzbar mittels Parametrierung und Monitoring über plattformunabhängiges User-Interface und lokaler Datenbank

## JEDERZEIT IN ALLE RICHTUNGEN SKALIERBAR

Die homogene Kommunikationsinfrastruktur, aufeinander abgestimmte Schnittstellen und ein einheitliches Regelungskonzept sichern den hocheffizienten und wirtschaftlichen Betrieb in Energienetzwerken. Der SE<sup>2</sup>OPTIMIZER sowie der SE<sup>2</sup>DIRECTOR und die SE<sup>2</sup>BOX reihen sich nahtlos ein. Dank einfach konfigurierbarer Schnittstellen ist auch die Modernisierung von Anlagen jederzeit möglich.



### SE<sup>2</sup>DIRECTOR

Sie wollen mehrere Anlagen bündeln und flexibel steuern? Dann kommt als übergeordnete Regelung unsere Leittechnik für virtuelle Kraftwerke zum Einsatz. Der SE<sup>2</sup>DIRECTOR übernimmt als Kommunikationsschnittstelle die Aggregation aller Anlagen und bildet das sichere Tor zum Direktvermarkt.

- Ein dezentrales Leitsystem zum Pooling mehrerer Anlagen
- Kosten- & Erläsoptimierung bei netzdienlichem Betrieb

### SE<sup>2</sup>BOX

Die einfache Lösung zur Kommunikationsanbindung von Energieerzeugern ohne Flexibilität oder zentralem Optimierungsansatz. Mit den drei Varianten (EEG, MultiDeviceGateway, VHPready) ist die SE<sup>2</sup>Box exakt auf den entsprechenden Einsatzzweck abgestimmt und sofort einsatzbereit.

- Direkter EE-Anlagenzugriff (Wind-, PV-, Biogas-Anlagen etc.)
- Schnittstelle zur Direktvermarktung

## TECHNISCHE DATEN & OPTIONEN

BEZEICHNUNG	SE <sup>2</sup> OPTIMIZER
Artikelnummer	2 000 481
Lieferumfang	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technische Dokumentation / Schaltplan</li> <li>• Vorkonfiguriert als Schaltschrank zur Wandmontage</li> <li>• Steckverbindungen</li> </ul>

SCHNITTSTELLEN
4 pot.-freie Kontakte für Einspeisemanagement
§20 EEG Direktvermarkterschnittstelle
Modbus TCP oder Profibus DP für Anlagensteuerung

SOFTWAREMODULE (optional)
Day-Ahead-Optimierung
Eigenstromoptimierung
Lastspitzenkappung Strom/Gas
Preisindiziertes Abschalten (neg. Preise)
KI-basierte Lastprognose
Grafisches Cockpit zur Visualisierung und Administration der Fahrpläne



HARDWARE	
Maße	450 x 300 x 209 mm (B x H x T)
Schutzart	IP 65
Gehäuse	Polycarbonat
Versorgung	230V AC / max. 50 W
Temperaturen	5°C - 40°C
Ethernet	2x RJ45, 10/100 Mbit/s
AVAT VPN-ROUTER	gesicherte Kommunikationsanbindung

Technische Änderungen vorbehalten

## THE ENERGY ENGINEERING COMPANY

Energie ist Fluss und Bewegung. Und auch Energiewirtschaft ist alles andere als starr und statisch. Erzeuger und Verbraucher kommen hinzu, oder fallen weg, Infrastrukturen wachsen, der Energiemix verschiebt sich analog zu Preistendenzen und Bestimmungen. Auch Sie werden davon kaum unberührt bleiben. Je länger Sie jedoch mit einer unserer Lösungen arbeiten, desto mehr profitieren Sie von unseren Prinzipien.

### PRINZIP 1: DURCHGÄNGIG

Von den BHKW-Gasmotoren und Energiezentralen, über die Leitetchnik in Kombination mit unserem Energiemanagement-System bis zur Anbindung an virtuelle Kraftwerke: Alles kommuniziert homogen miteinander, unsere Regelungskonzepte sind einheitlich.

### PRINZIP 2: MODULAR

Durchgängigkeit plus eine Vielzahl von Schnittstellen sind beste Voraussetzungen dafür, dass Ihre Lösung nicht „aus dem Regal“ kommt, sondern Module individuell auf Sie zugeschnitten kombiniert. Das gilt für Hard- und Software gleichermaßen.

### PRINZIP 3: ERWEITERBAR

Wachstum ist für unsere Lösungen kein Einschnitt, sondern eine organische, bruchlose Entwicklung. Als Verantwortlicher reagieren Sie genau dann, wenn die größeren Kapazitäten wirklich gebraucht werden. Dann aber geht es ganz schnell.

### PRINZIP 4: KONFIGURIERBAR

Klingt nicht sehr besonders? Ist es aber: Denn projektspezifische Anpassungen auf Software-Ebene erfordern üblicherweise Programmierarbeiten. Bei uns reicht dagegen eine einfache, schnelle und sichere Konfiguration.



## Anhang 6: Interviewleitfäden

## 1. Leitfaden Dienstleister

Mündliches Experteninterview vor Ort

Interviewpartner:

Datum:

Relevante Fragen bzgl. der Prozessaufnahme

Wie stellt sich Ihr Ansatz zum Betrieb eines Virtuellen Kraftwerks dar?

Wie stellt sich Ihre Zusammenarbeit mit Schlüsselpartnern dar?

Partnerschaft mit den Stadtwerken

Welche Formen der Zusammenarbeit gehen Sie mit Stadtwerken ein?

Mit welchen Herausforderungen sehen Sie sich konfrontiert, eine geeignete Partnerschaft mit einem Stadtwerk einzugehen? Woran hakt es oft?

Welche Faktoren tragen hierbei maßgeblich zum Erfolg bzw. zum Scheitern bei?

Können Sie durch den Betrieb eines Virtuellen Kraftwerks strukturelle, kulturelle und strategische Veränderungen bei den Stadtwerken beobachten?

Wo sehen Sie die zukünftige Rolle eines Stadtwerks vor dem Hintergrund einer voranschreitenden Digitalisierung?

Kooperatives Lastmanagement

Welches Potenzial schreiben Sie dem Ansatz des kooperativen Lastmanagements zu?

Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration des kooperativen Lastmanagements?



## 2. Leitfaden Stadtwerke

Mündliches Experteninterview vor Ort

Interviewpartner:

Größe des Stadtwerks bzw. erzielter Jahresumsatz:

Datum:

Relevante Fragen bzgl. der Prozessaufnahme

Wie stellt sich Ihr Ansatz zum Betrieb eines Virtuellen Kraftwerks dar?

Wie stellt sich Ihre Zusammenarbeit mit Schlüsselpartnern dar?

Integration eines Virtuellen Kraftwerks in das Stadtwerk

Mit welchen Herausforderungen sahen/sehen Sie sich konfrontiert, ein Virtuelles Kraftwerk in Ihr Tagesgeschäft zu integrieren? Was waren dabei die wesentlichen Faktoren, die zu einem Erfolg bzw. zu einem Scheitern beigetragen haben?

Welche Chancen ergeben sich aus dem Betrieb eines Virtuellen Kraftwerks?

Wie weit hat der Betrieb eines Virtuellen Kraftwerks Auswirkungen auf die Strategie, die Struktur und die Kultur Ihres Unternehmens?

Kooperatives Lastmanagement

Welches Potenzial schreiben Sie dem Ansatz des kooperativen Lastmanagements zu?

Welche Herausforderungen sehen Sie bei der Integration des kooperativen Lastmanagements?