

Innovative Anlagenkonzepte für den Strommarkt der Zukunft

Ein Zwischenstand aus dem Projekt

arrivee 

Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein
in intelligenten Verteilnetzen mit
erneuerbarer Energieerzeugung

ERWAS-DACH-Seminar – Voneinander Lernen, 13. September 2016 in Augsburg

Oliver Gretzschel, Michael Schäfer, Theo G. Schmitt, FG Siwawi TU Kaiserslautern

Inka Hobus, WiWmbh Wuppertal

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

 FONA
Nachhaltiges
Wassermanagement
BMBF



Gliederung

Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

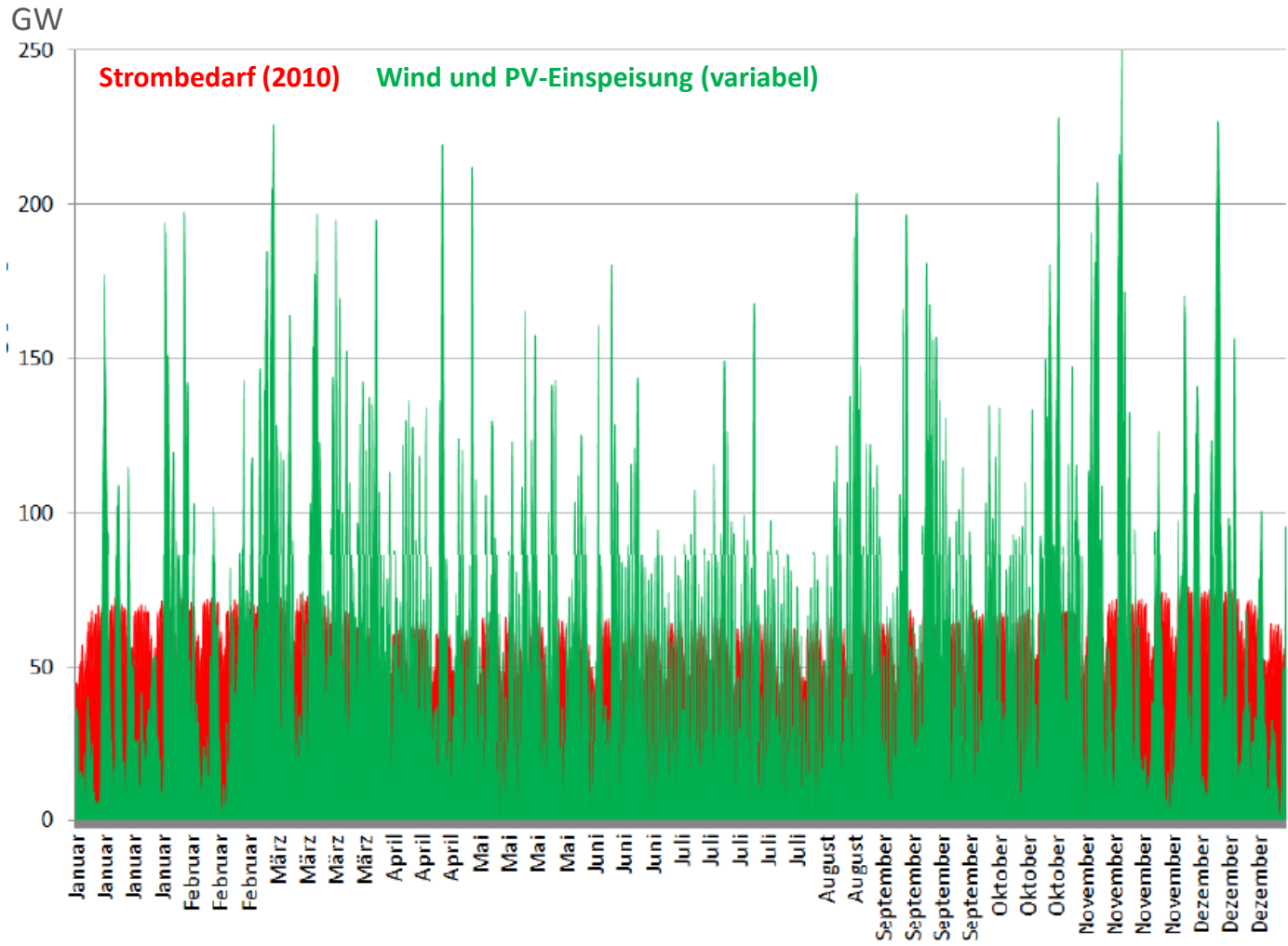
Märkte für Flexibilität

Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

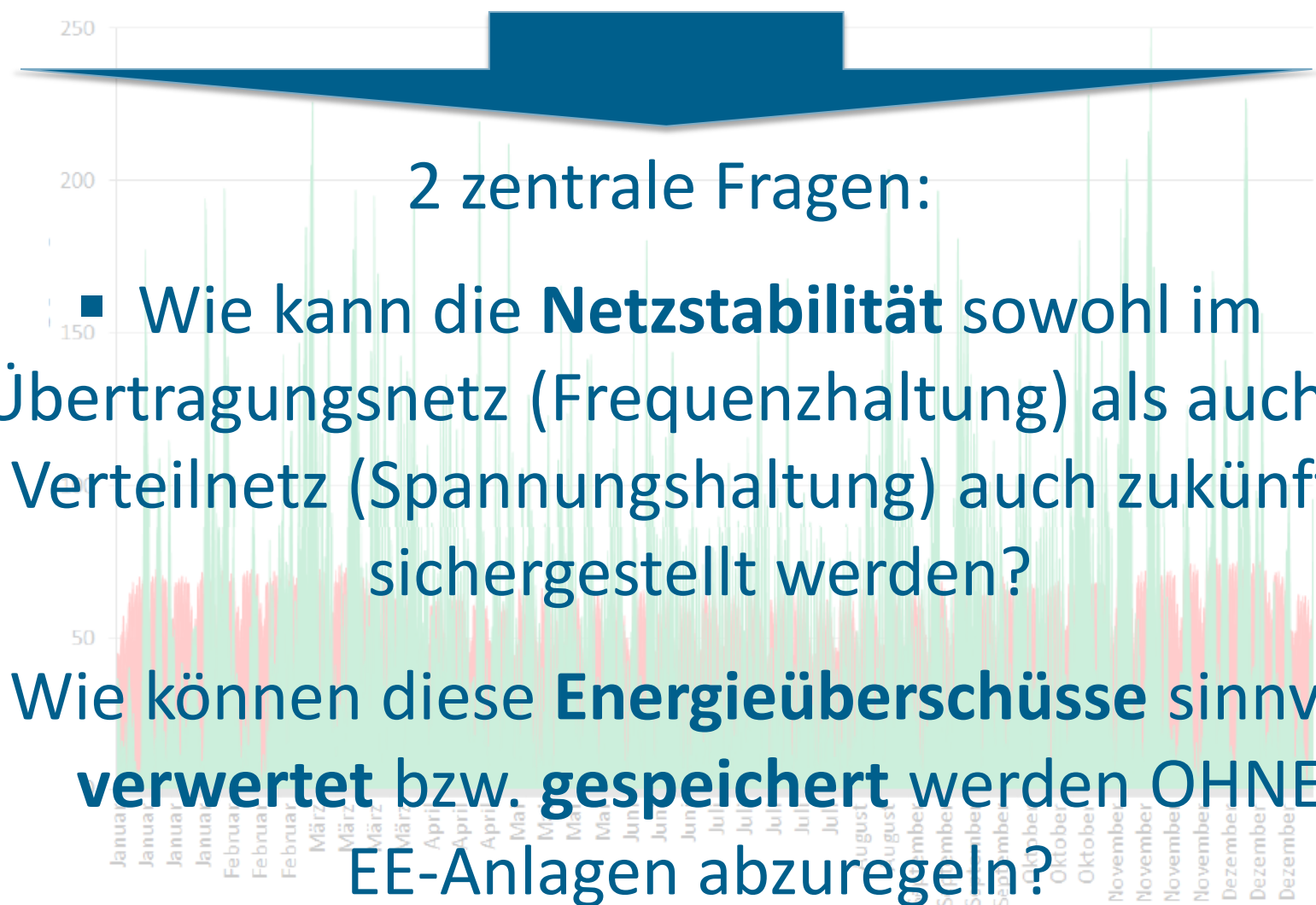
- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick



(Stadler 2012)

- Starke Schwankungen auf Erzeugerseite
- Über- UND Unterschreitung Bedarf
- Netzstabilität: Abregelung EE-Erzeuger
- zunehmend kritische Systemzustände!
- EE 100 % - Flexi & Speicher!**
- EE 80 % - Flexi & Speicher!**
- EE 60 % - Flexi! Speicher?**
- EE 40 % - Flexi! Speicher?**
- EE 20 %**

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick



Hintergrund & Grundlagen

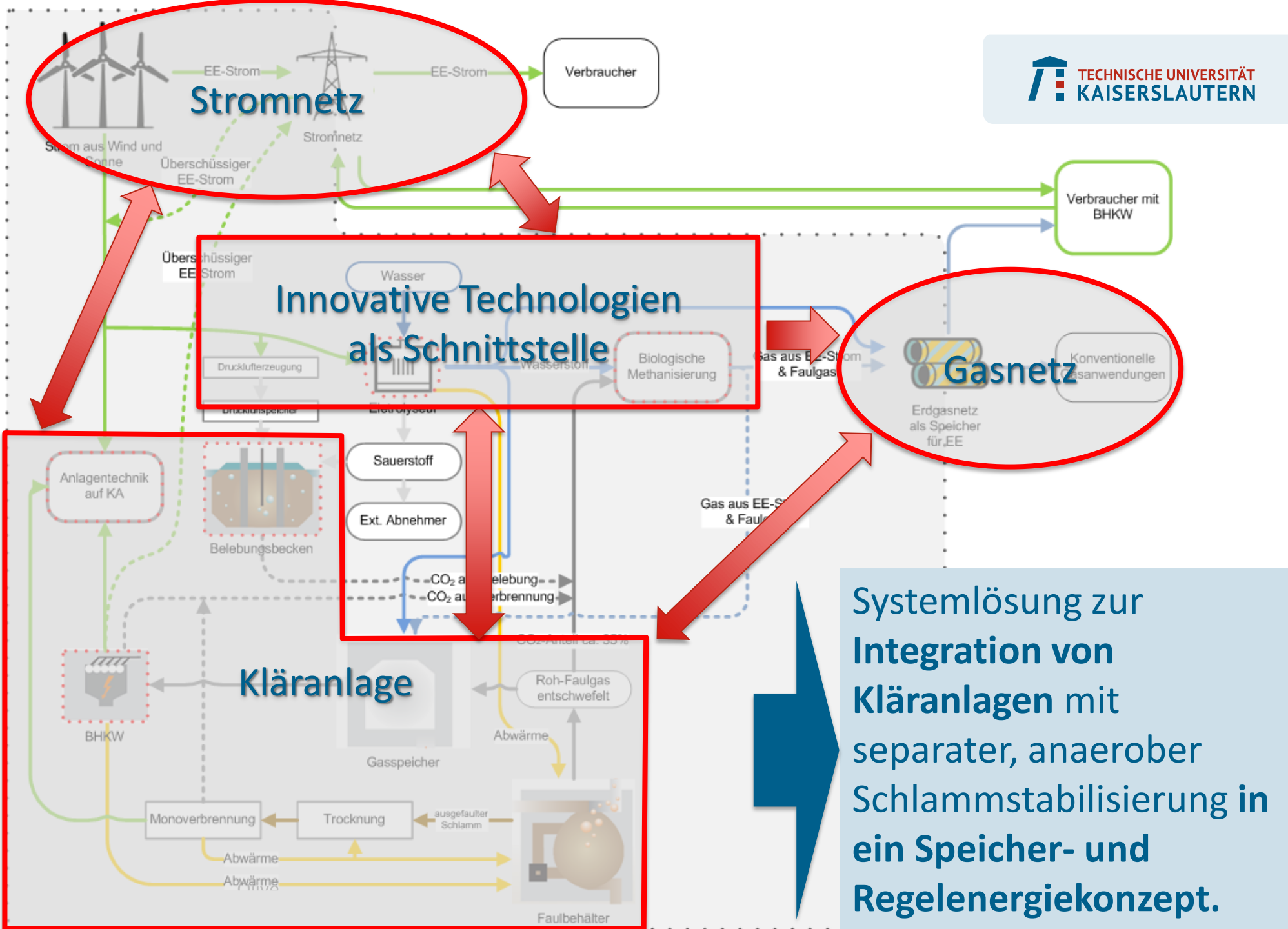
Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung
und Ausblick



Hintergrund & Grundlagen

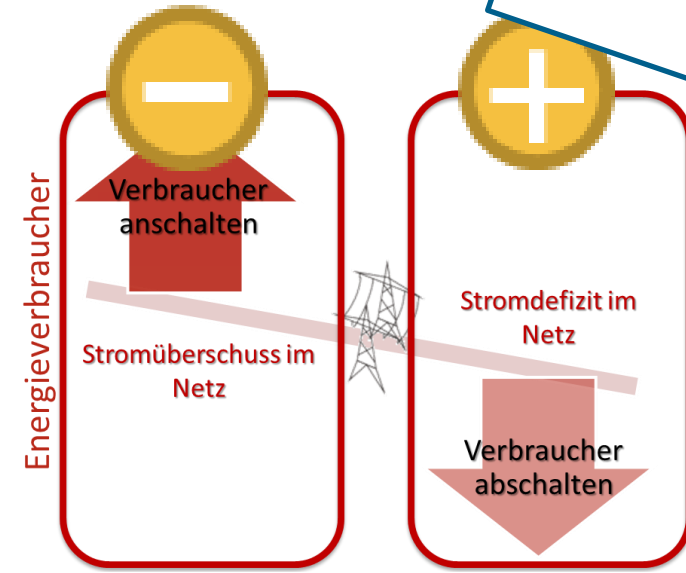
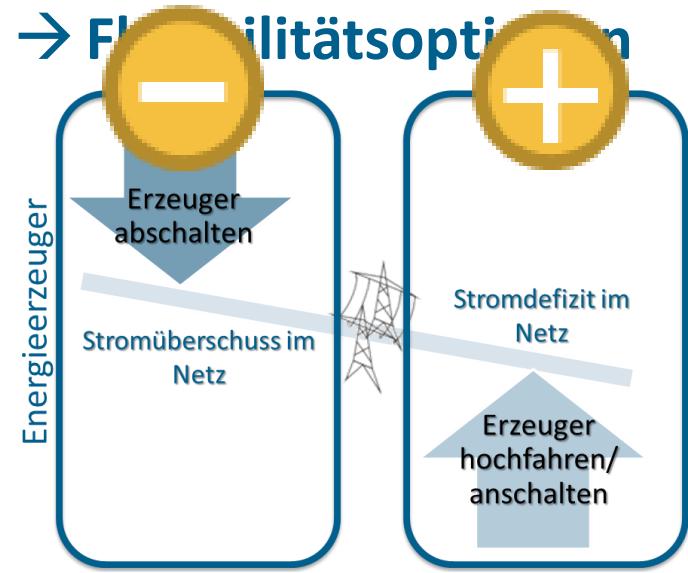
Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

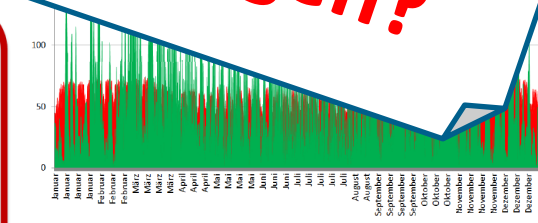
Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung
und Ausblick

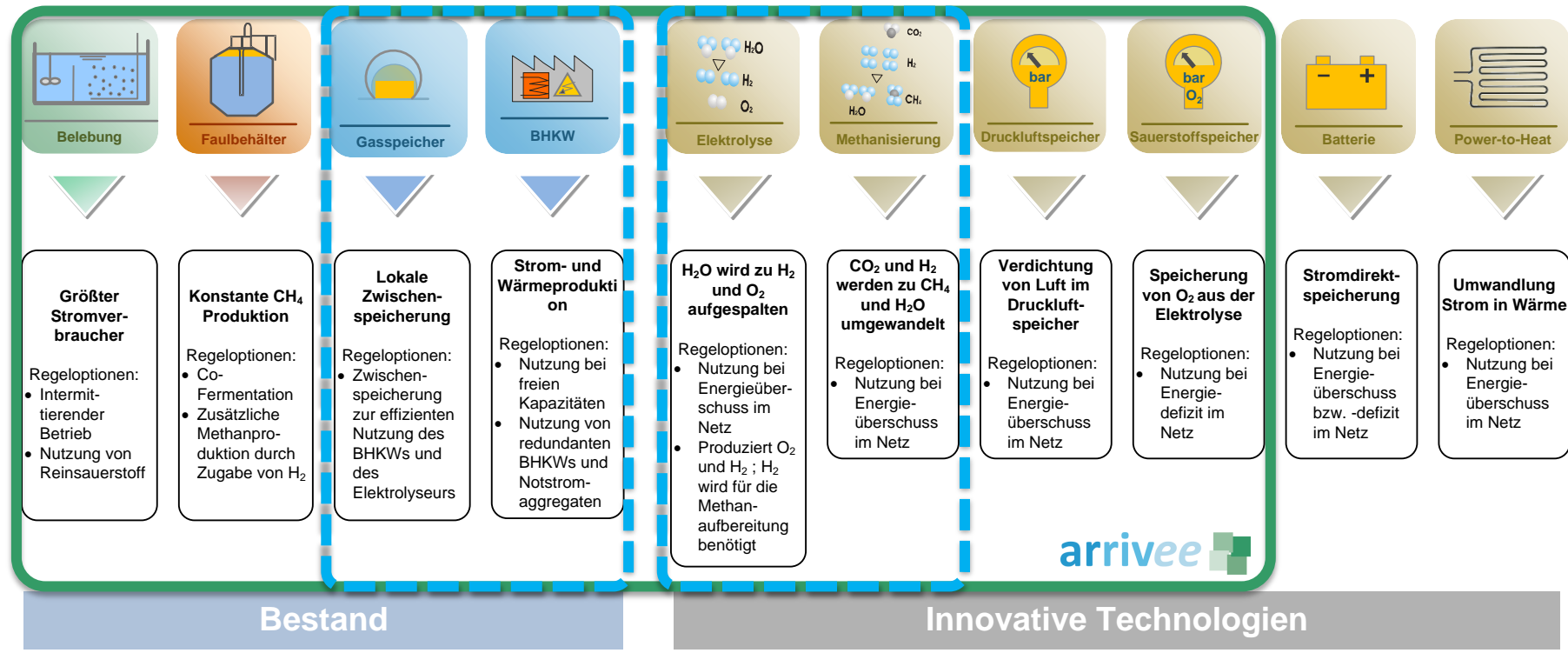


Flexibilität auf Kläranlagen?



Stromverbraucher bzw. -erzeuger = **Flexibilitätsoption**
 Flexible Fahrweise → flexible Last → Dienstleistung
 Markt: abh. von Anlagencharakteristik (z. B. Geschwindigkeit des Anfahrens)

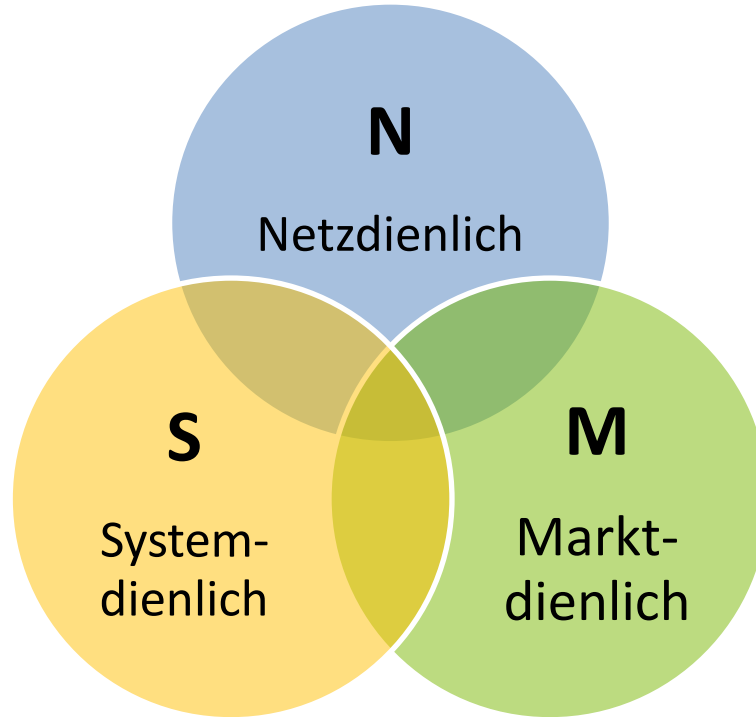
- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen**
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick



+ weitere Aggregate z. B. der Schlammmentwässerung oder Netzersatzanlagen

Potenzialabschätzung

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität**
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick



Systemdienlicher Einsatz

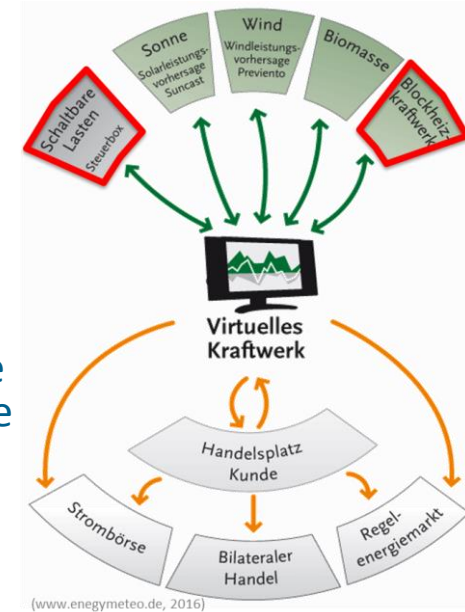
Einsatzort: Übertragungsnetz
 Funktion: Frequenzhaltung (50 Hertz)
 Produkt: Regelenergie
 Markt: aktiv

Marktdienlicher Einsatz

Einsatzort: Spotmarkt der Strombörse
 Funktion: Verwertung EE-Überschüsse
 Produkt: Day-Ahead, Intraday
 Markt: aktiv

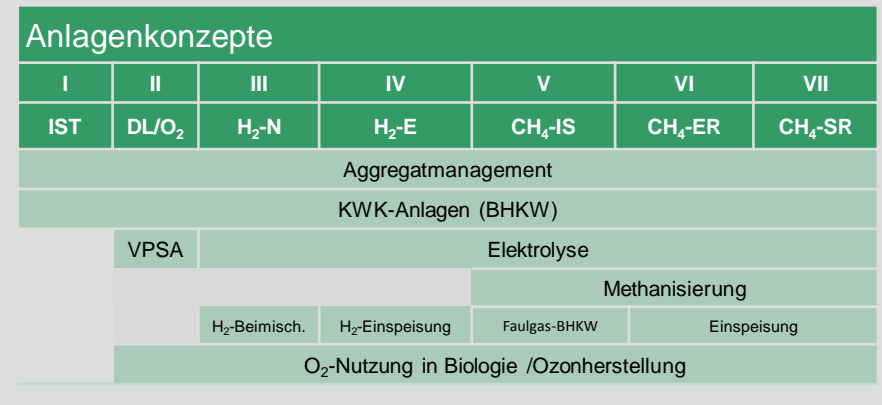
Netzdienlicher Einsatz

Einsatzort: Verteilnetz
 Funktion: Spannungshaltung, Betriebsmitteleffizienz
 Produkt: noch nicht definiert
 Markt: noch nicht aktiv



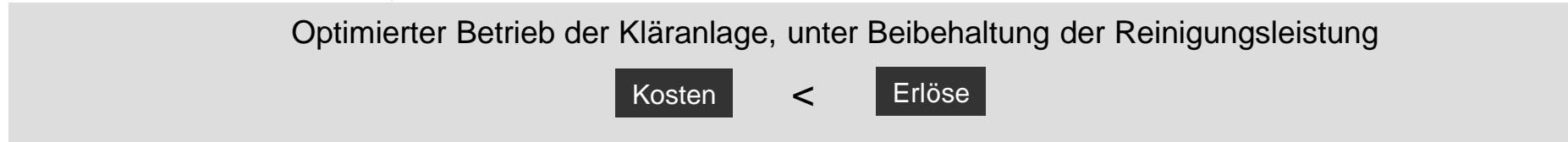
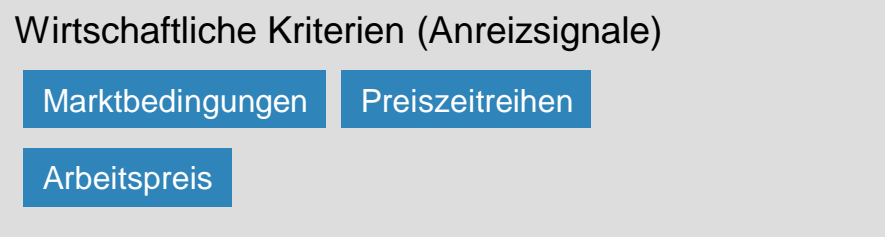
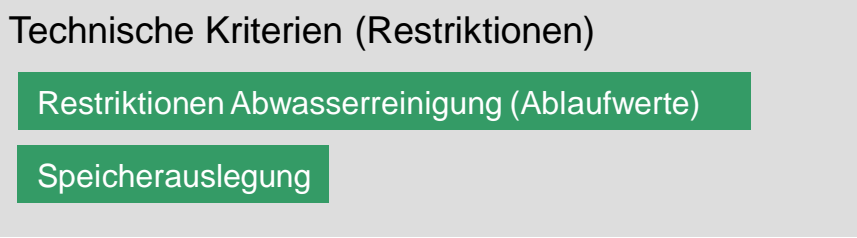
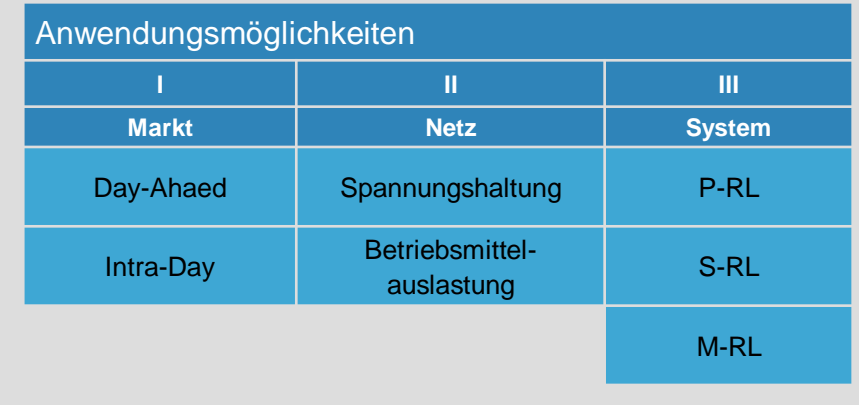
- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte**
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick

Kläranlage



IST-StatusQuo; DL-DruckLuft; N-Nutzung; E-Einspeisung; I-InSitu (im Faulbehälter); ER-ExternerReaktor (Biol.Meth.); SR-SabatierReaktor

Flexibilität



Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

Datengrundlage:

- **Bundesweite** Auswertung Kläranlagennachbarschaften
- Abgleich mit kommunalen Lageberichten
- → $EW_{\text{anaerob}} = 104,1 \text{ Mio. E}$

Potenzialermittlung für *Ist-Zustand* und *optimierter Bestand*:

- Ist-Zustand:
 - KWK-Bestand heute
- Optimierter Bestand:
 - Vollausrüstung mit KWK (BHKW, Gasturbine)
 - Steigerung der Energieausbeute (Repowering, Hoch-Last-Faulung, Betriebliche Optimierung, Desintegration)
 - Umstellung auf Faulung (> 10.000 E)
 - Ausnutzung von Kapazitätsreserven (Schlammbehandlungszentren 2.000 bis 10.000 E, Co-Vergärung)



**Kläranlagenpotenzial nur KWK (!): 300 MW_{el}
→ ca. 15 % Anteil der neg. MRL**

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte**
- Potenziale**
- Schlussfolgerung und Ausblick

Potenzialbereich	Klärgas [Mio. m ³]	Jahresprimärenergiemenge ¹⁾ [TWh/a]	Stromproduktion [TWh _{el} /a]	
Ist-Zustand	645	4,5	1,25	143
Ausrüstung aller Anlagen mit KWK-Aggregaten	88	0,6	0,20 – 0,25	22,4 – 28,0
Steigerung der Energieausbeute	101	0,7	0,21 – 0,26	24,0 – 30,0
Umstellung auf Faulung	173 – 259	1,1 – 1,7	0,36 – 0,67	41,0 – 76,8
Kapazitätsreserven - A				
Schlammbehandlungszentren	47 – 70	0,3 – 0,5	0,10 – 0,18	11,1 – 20,8
Kapazitätsreserven - B				
Externe Substrate	(266 – 489)	(1,7 – 3,2)	(0,6 – 1,3)	(63 – 145)
Gesamtpotenzial	407 – 517	7,2 – 7,9	2,1 – 2,6	241 – 298

¹⁾ Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/m³
²⁾ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

(Schäfer et al. 2015)

Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

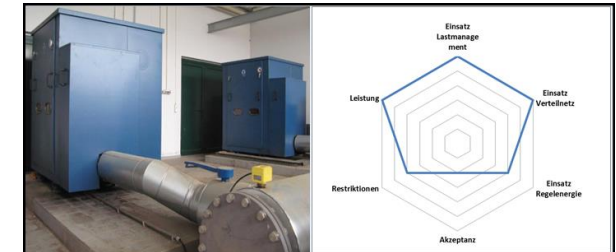
Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

arrivee-Pilotanlage Radevormwald

- Datenblatt je untersuchtes Aggregat:
 - Sandfanggebläse
 - **Belüftung (Biologie)**
 - Rührwerke (Biologie)
 - **Rücklaufschlammumpen**
 - Rezirkulationspumpen
 - Heizschlammumpen (Faulturm)
 - Rohschlammumpen (Faulturm)
 - Rührwerke (Faulturm)
 - **Seihbandanlage/ÜSS-Pumpen**
 - Kammerfilterpresse



Aggregat	Gebläse BB	Belüftung
Baugruppe	Biologische Stufe	
Installierte Nennleistung	445,0	[kW]
Nutzbare Leistung	(+) 61,6 - 98,9	[kW]
Einsatzbereich	Positive Flexibilität	
Jahresnutzungsstunden	8.760	[h/a]
Min. Abschaltdauer	5	[min]
Max. Abschaltdauer	60	[min]
Regenerationszeit	15	[min]
Anfahrzeit	10	[s]
Abfahrzeit	5	[s]
Restriktion 1	$C_{NH4, BBab} < C_{NH4, BBab, Grenz}$	[mg/l]
Restriktion 2	$Q_{ist} < Q_{grenz}$	[l/s]

Aggregat	Rücklaufschlammumpen	Nachklärung
Baugruppe	Nachklärung	
Installierte Nennleistung	90,0	[kW]
Nutzbare Leistung	(+) 16,07 - 23,63	[kW]
Einsatzbereich	Positive Flexibilität	
Jahresnutzungsstunden	8.760	[h/a]
Min. Abschaltdauer	5	[min]
Max. Abschaltdauer	120	[min]
Regenerationszeit	60	[min]
Anfahrzeit	60	[s]
Abfahrzeit	5	[s]
Restriktion 1	$H_{ist} < H_{Grenz}$	[cm]
Restriktion 2	$Q_{ist} < 500$	[l/s]

Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

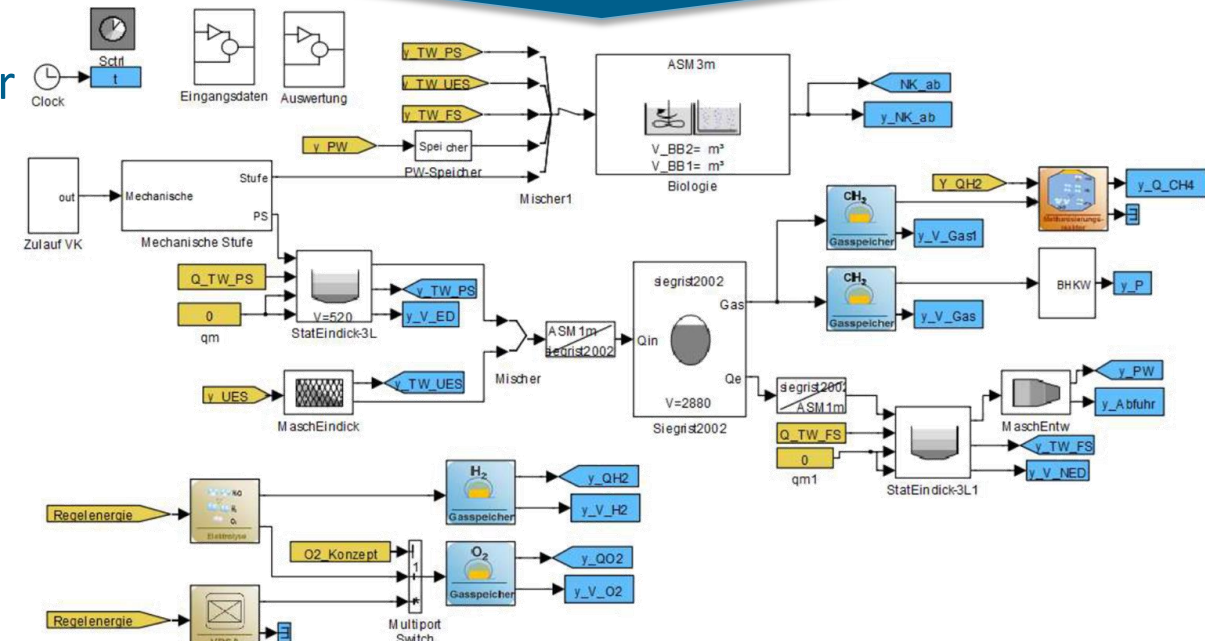
Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

arrivee-Pilotanlage Radevormwald

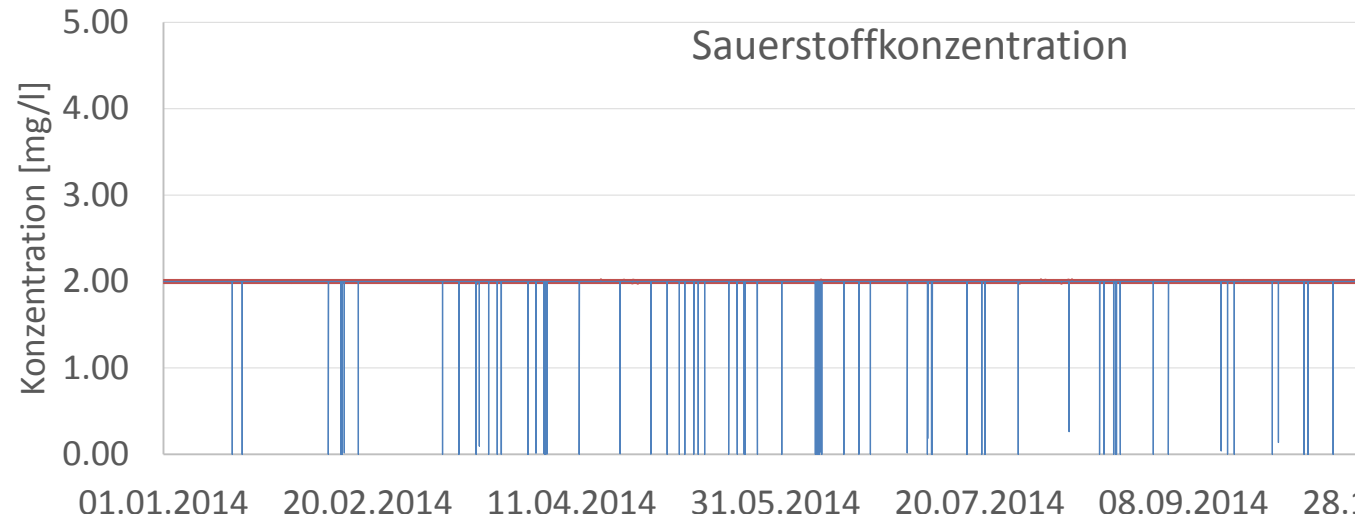
- Ermittlung der Potenziale mit Hilfe der Simulation
- Grundlage der Handlungsempfehlungen zur Potenzialermittlung für Betreiber
- Grundlage für die Einbindung der KA Radevormwald in ein virtuelles Kraftwerk



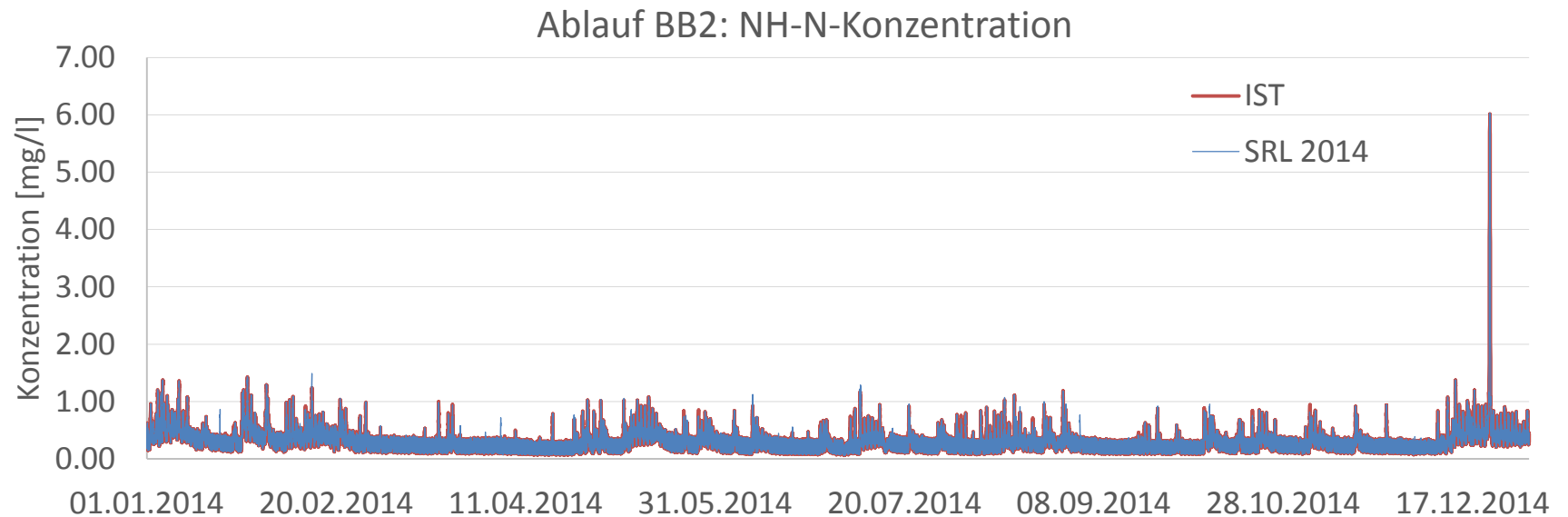
Simulation von Flexibilitätsoptionen: SRL

-Bedienen aller Abrufe ohne Restriktion-

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte**
- Potenziale**
- Schlussfolgerung und Ausblick



- **Eingangsdaten:**
 - Zulaufbelastung zur Kläranlage 2014
- **Märkte und Flexibilitätsoptionen:**
 - **SRL und MRL** für Gebläse, Rücklaufschlammpumpe und Seihband
- **Ergebnis:**
 - Leistungsaufnahme der Kläranlage
 - Ammoniumablaufkonzentration BB & NK
 - Ableitung und Optimierung von Restriktionen



Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

Anlagenkonzepte

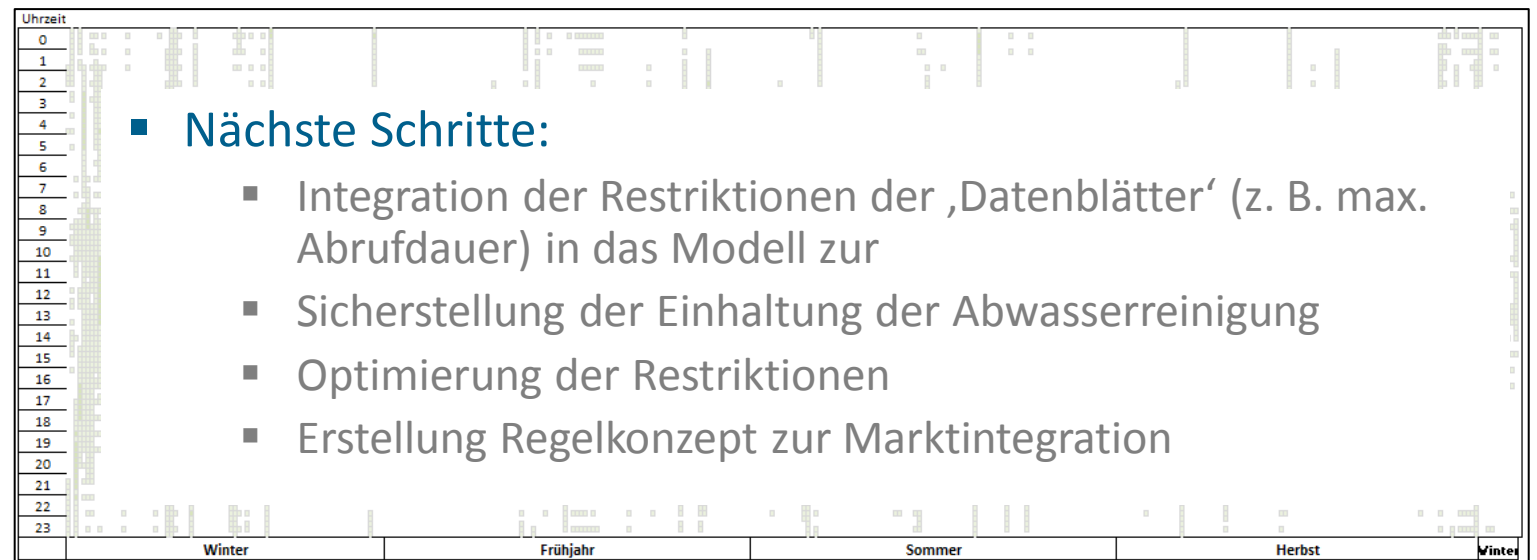
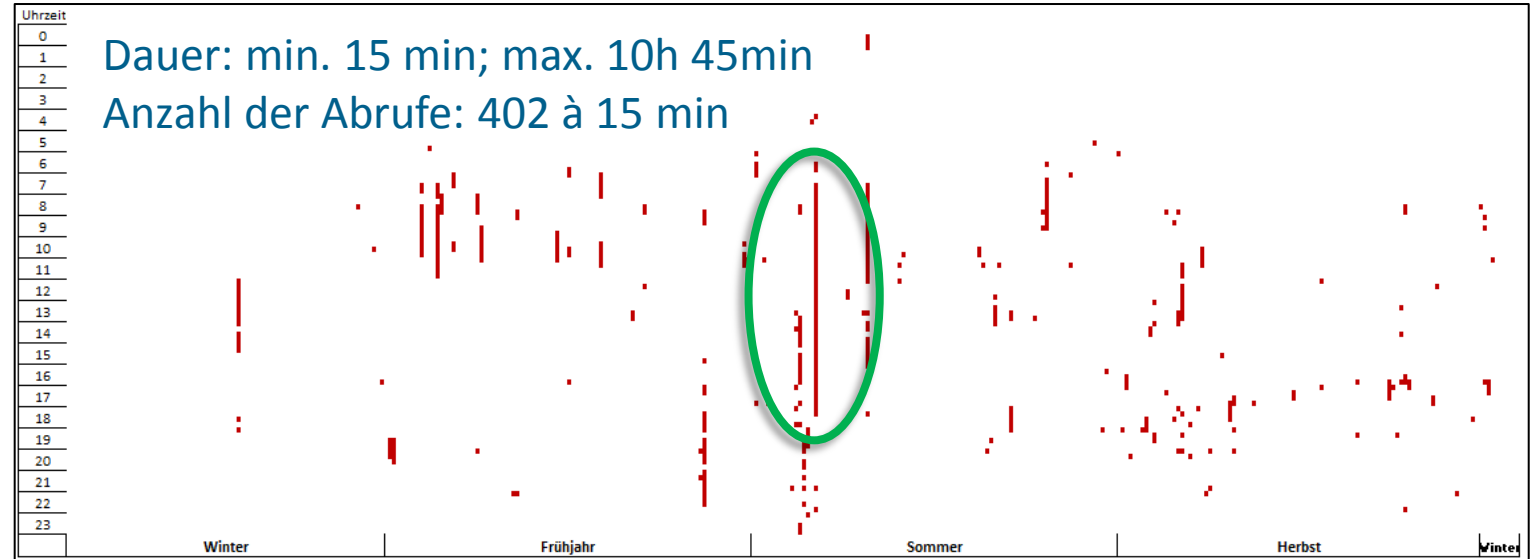
Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

Signale
aus Markt-
potenzial
MRL-2014
(positiv)

Restriktion
NH₄-Konz.
(Ablauf BB)

>= 4
>= 3
>= 2
>= 1
>= 0,5



Nächste Schritte:

- Integration der Restriktionen der ‚Datenblätter‘ (z. B. max. Abrufdauer) in das Modell zur
- Sicherstellung der Einhaltung der Abwasserreinigung
- Optimierung der Restriktionen
- Erstellung Regelkonzept zur Marktintegration

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte**
- Potenziale**
- Schlussfolgerung und Ausblick

Markt	SRL				MRL			
	2014				2014			
Stützzahr	2014				2014			
Flexibilisierung	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ	positiv	negativ
Bewertung (+/-)	+	+	+	-	+	+	+	+
Aggregatentyp	BHKW		Aggregate		BHKW		Aggregate	
Einnahmen [€/a]	1.839	1.845	5.398	0	440	2.033	2.159	173
Betriebsstunden	4.632	4.632	8.760	2.920	4.632	4.632	8.760	2.920
Arbeitspreis [€/MWh]	2.000	-2.000	2.000	-2.000	200	-200	200	-200
Abrufstunden	5,27	16,95	5,27	16,95	100,50	17,00	100,50	12,25
Leistung [kW]	160	80	120	25	80	80	120	25

SRL-Einnahmen: ca. 9.000 €
 SRL: Alle Abrufe können bedient werden

MRL-Einnahmen: ca. 5.000 €
 MRL: 80 % der Abrufe können unter Einhaltung $BB_{ab} < 4\text{mg/l}$ bedient werden

Hintergrund & Grundlagen

Flexibilitätsoptionen

Märkte für Flexibilität

Anlagenkonzepte

Potenziale

Schlussfolgerung und Ausblick

Datengrundlage und Annahmen:

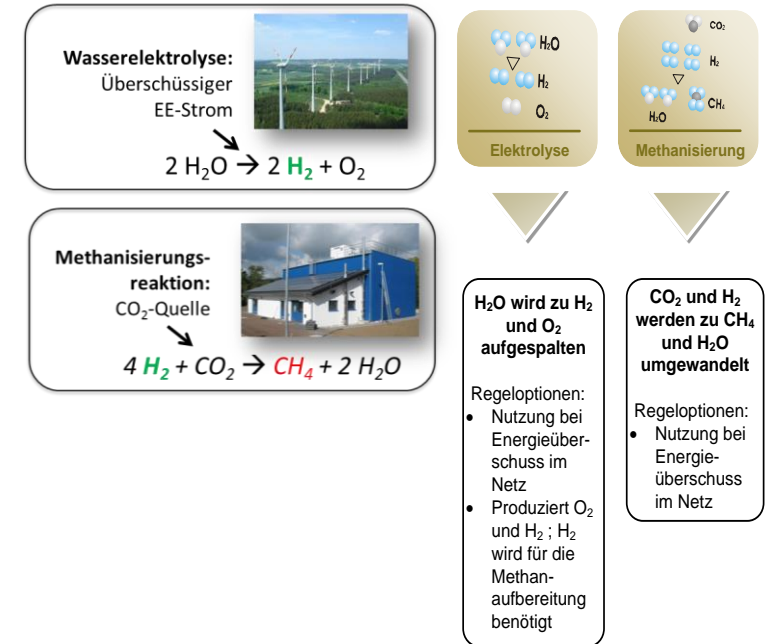
- $EW_{\text{anaerob}} = 104,1 \text{ Mio. E (Status-Quo)}$
- $CO_2\text{-Anteil im Faulgas } 35\%$, Faulgasanfall $21,3 \text{ l/ (E}\cdot\text{d)}$
- ca. 4.000 Vollbenutzungsstunden der Elektrolyse
- Zwischenspeicherung H_2

Potenzialermittlung für 100%-
Verwertung des CO_2 -Anteils im Faulgas

Flexibilitätpotenzial durch Elektrolyse:

- ca. 1,4 GW
- \rightarrow ca. 9 fache heutige KWK-Leistung
- Speicherung von $4.000\text{h} \cdot 1.400 \text{ MW} = 5,6 \text{ TWh}$ EE-Strom in CH_4
- Langzeitspeicherung
- Realisierungszeitraum: ab ca. 60% EE-Strom im Netz

Oliver Gretzschel, Michael Schäfer, Theo G. Schmitt, Inka Hobus



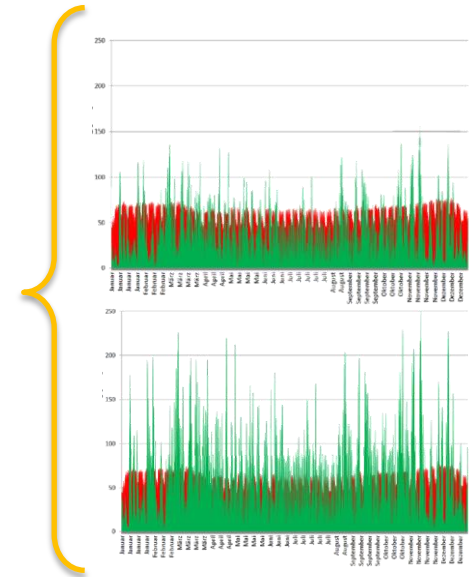
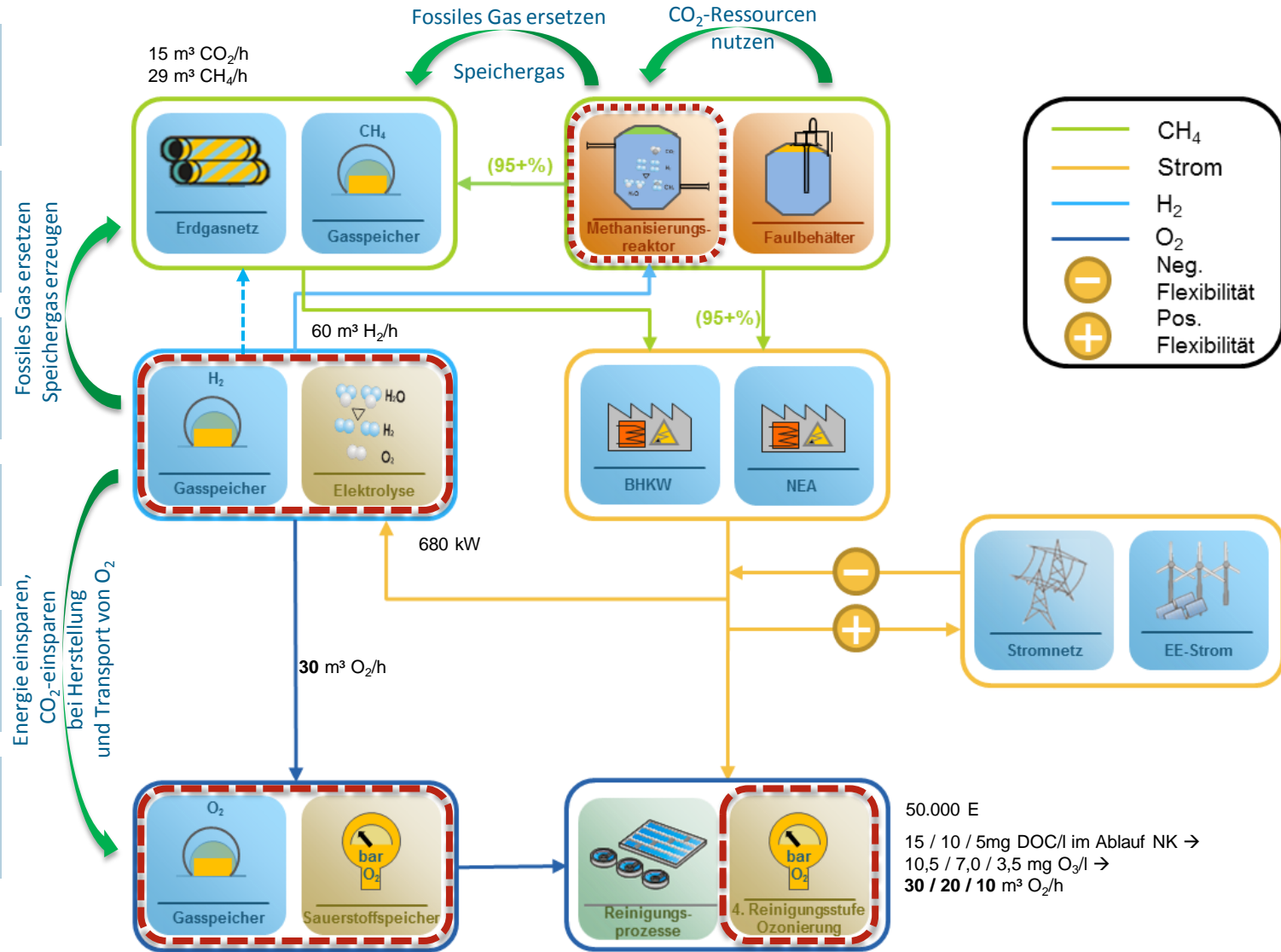
Bedarf:

- ab ca. 74 % EE-Anteil, ca. ab 2035: steigend bis 89 GW in 2050
- Abregelung EE in 2015: 3,1 TWh

(SFV 2016)
(Götz et al. 2016)

Kläranlagenpotenzial: Elektrolyse \rightarrow ca. 70% Anteil der neg. MRL

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte**
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick



- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick

Konzept I: Ausgangszustand - Status Quo

Beschreibung	Die Flexibilität Betrachtung richtet sich auf den Anlagenbestand. Dabei werden sowohl die Bauteile der Anlagentechnik als auch die Flexibilität der Anlagentechnik mit der lokalen Flexibilität der Anlagentechnik in Betrachtung genommen. Ziel ist die Bereitstellung negativer Flexibilität durch den Betrieb geeigneter Aggregate. Klärgas wird zeitversetzt verstromt. Bereitstellung positiver Flexibilität durch BHKW-Verstromung.
Umsetzungskriterien	BHKW
Relevante Flexibilitätsebenen	Stromverbraucher Methan/Wasserstoff-Einspeisung Stromerzeuger (z. B. BHKW, ...)
Flexibilitätsbausteine	BHKW NEA Verdichter + weitere Aggregate
Konzeptstufe	Status-Quo Wasserstoff Methanisierung
EE-Umwandlung (Systemwirkungsgrad)	Stromverbrauch Power-to-Gas Power-to-Gas-to-Power
theoretische Potenziale POS	...spezifisch ...bundesweit
theoretische Potenziale NEG	...spezifisch ...bundesweit
Speicheroptionen	Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher sonstige
Speicherkapazität	Kurzzeitspeicher...spezifisch Kurzzeitspeicher...bundesweit Langzeitspeicher...spezifisch Langzeitspeicher...bundesweit

Konzept IV: H₂-Einspeisung

Beschreibung	Dieses Konzept ergänzt den Anlagenbestand um den Baustein der Wasserelektrolyse zur Umwandlung von überschüssigem Strom in Wasserstoff. Der Wasserstoff wird in einem Gasspeicher gespeichert und über ein Gasnetz in die lokale Gasinfrastruktur eingespeist. Die Flexibilität des Systems wird durch die Flexibilität der Wasserelektrolyse und der Gasinfrastruktur bestimmt. Die Flexibilität des Systems wird durch die Flexibilität der Wasserelektrolyse und der Gasinfrastruktur bestimmt.
Umsetzungskriterien	Wasserelektrolyse
Relevante Flexibilitätsebenen	Stromerzeuger Wasserelektrolyse Wasserelektrolyse
Flexibilitätsbausteine	BHKW NEA Verdichter + weitere Aggregate
Konzeptstufe	Status-Quo Wasserstoff Methanisierung
EE-Umwandlung (Systemwirkungsgrad)	Stromverbrauch Power-to-Gas Power-to-Gas-to-Power
theoretische Potenziale POS	...spezifisch ...bundesweit
theoretische Potenziale NEG	...spezifisch ...bundesweit
Speicheroptionen	Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher sonstige
Speicherkapazität	Kurzzeitspeicher...spezifisch Kurzzeitspeicher...bundesweit Langzeitspeicher...spezifisch Langzeitspeicher...bundesweit

Konzept VI: Methanisierung im externen Reaktor (biologische Methanisierung)

Beschreibung	Dieses Konzept kombiniert den Baustein der Wasserelektrolyse mit dem Methanisierungsreaktor zur Umwandlung von überschüssigem Strom in Methan. Das Methan wird in einem Gasspeicher gespeichert und über ein Gasnetz in die lokale Gasinfrastruktur eingespeist. Die Flexibilität des Systems wird durch die Flexibilität der Wasserelektrolyse, der Methanisierung und der Gasinfrastruktur bestimmt.
Umsetzungskriterien	Wasserelektrolyse Methanisierungsreaktor
Relevante Flexibilitätsebenen	Stromerzeuger Wasserelektrolyse Methanisierungsreaktor
Flexibilitätsbausteine	BHKW NEA Verdichter + weitere Aggregate
Konzeptstufe	Status-Quo Wasserstoff Methanisierung
EE-Umwandlung (Systemwirkungsgrad)	Stromverbrauch Power-to-Gas Power-to-Gas-to-Power
theoretische Potenziale POS	...spezifisch ...bundesweit
theoretische Potenziale NEG	...spezifisch ...bundesweit
Speicheroptionen	Kurzzeitspeicher Langzeitspeicher sonstige
Speicherkapazität	Kurzzeitspeicher...spezifisch Kurzzeitspeicher...bundesweit Langzeitspeicher...spezifisch Langzeitspeicher...bundesweit

Ausführung zu:
Konzeptbeschreibung
Umsetzungskriterien
Flexibilitätsebene & bausteine
Flexibilitätspotenziale
Speicheroptionen
Speicherkapazität

Die Kläranlage auf dem Weg zum integrierten Energiesystemdienstleister

- Hintergrund & Grundlagen
- Flexibilitätsoptionen
- Märkte für Flexibilität
- Anlagenkonzepte
- Potenziale
- Schlussfolgerung und Ausblick

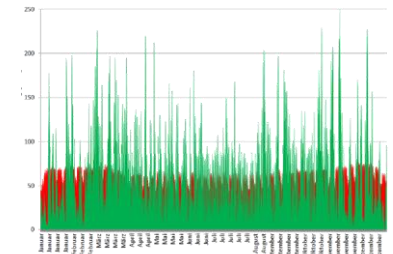
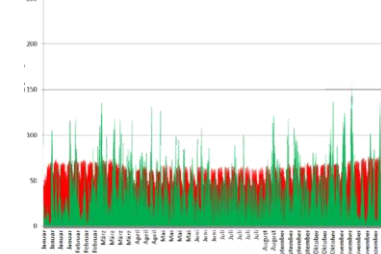
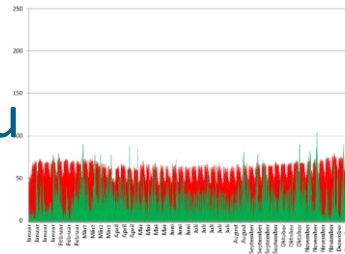
Flex-Potenzial

150 MW

300 MW

1.400 MW

EE-Strom-Ausbau



heute

2030

2045

Flexibilitäts- & Speicherbedarf

Erschließen von Flexibilitäts- und Speicheroptionen

Potenzialerhöhung

Funktionen



BHKW

ausgewählte Aggregate

Elektrolyse und Methanisierung

Umstellung & Optimierung Faulung

Re-Powering KWK

C-Ausschleusung ...

Effizienzsteigerung...

!! Abwasserreiniger !! +

- Energie-Netzdienstleister
- Stromproduzent
- Speichergasproduzent

+

- Nährstofflieferant
- Rohstoffproduzent
- Bioraffinerie

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

➔ Vortrag als  unter:
www.erwas-arrivee.de

siwawi.bauing.uni-kl.de

Oliver Gretzschel, Michael Schäfer, Theo G. Schmitt, FG Siwawi
TU Kaiserslautern
Inka Hobus, WiWmbh Wuppertal



Steinmetz, Heidrun (2016): Wertstoff Abwasser. Antrittsvorlesung an der TU Kaiserslautern, Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung.

Salomon, Dirk; Taudien, Yannick; Schäfer, Michael (2016): Flexibilität auf Kläranlagen - Betriebliche Restriktionen. Posterpräsentation. 44. Abwassertechnisches Seminar (ATS) 14.7.2016, Ismaning

Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Taudien, Yannick (2016): Flexibilität auf Kläranlagen -Anlagenkonzepte & Energiebilanzierung. Posterpräsentation. 44. Abwassertechnisches Seminar (ATS) 14.7.2016, Ismaning

Schmitt, Theo G. (2016): Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung. Vortrag auf der ERWAS Status Konferenz am 2. und 3. Februar 2016, Essen

Götz, Philipp; Hunecke, Fabian; Lenck, Thorsten; Perez Linkenheil, Carlos (2016): MINIMALER BEDARF AN LANGFRISTIGER FLEXIBILITÄT IM STROMSYSTEM BIS 2050, Studierenerweiterung. http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/fin2016-02-24_EnergyBrainpool_Minimaler_Windgasbedarf_GreenpeaceEnergy.pdf, Engery Brainpool, Berlin

SFV (2016): Speichern statt Abregeln! http://www.sfv.de/artikel/speichern_statt_abregeln.htm

Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Schmitt, Theo G.; Hobus, Inka (2015): arrivee - Abwasserreinigungsanlagen in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung. DWA Energietage 2015. Wuppertal

Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Knerr, H.; Schmitt, T. G.; (2015): Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in virtual power plants– A potential analysis. Energy Procedia Vol. 73 , 87 - 93

Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael (2015): Energieverbraucher und Flexibilitätsoptionen in der Prozesskette der Abwasser- und Klärschlammbehandlung. Seminar der Transferstelle Bingen: Baustein in den Stromnetzen der Zukunft am 8 Juli 2015, Vortrag, Koblenz

Stadler, Ingo (2012): Förderung, alte Märkte und neue Marktmodelle für Energiespeicher – Ansatzvarianten aus der technischen Notwendigkeit abgeleitet. Eurosolar-Symposium. Bonn, 12.04.2012