

RePhoR-Webinar

Strategische Investitionsplanung:

Die ISAH-Modulbibliothek und Beispiele aus dem Projekt SATELLITE

Montag, 03. November 2025 14.00 – 16.00 Uhr

Gefördert durch:





















Verfahrensbewertung vor- und nachgelagerter Prozesse der Phosphorrückgewinnung

Entscheidungsunterstützung für einen KS-Verbund

FKZ 02WPR1546 A bis J Laufzeit: 01.07.2020 – 31.12.2025 Projektleitung / Gesamtkoordination Dr.-Ing. M. Beier (ISAH-LUH)







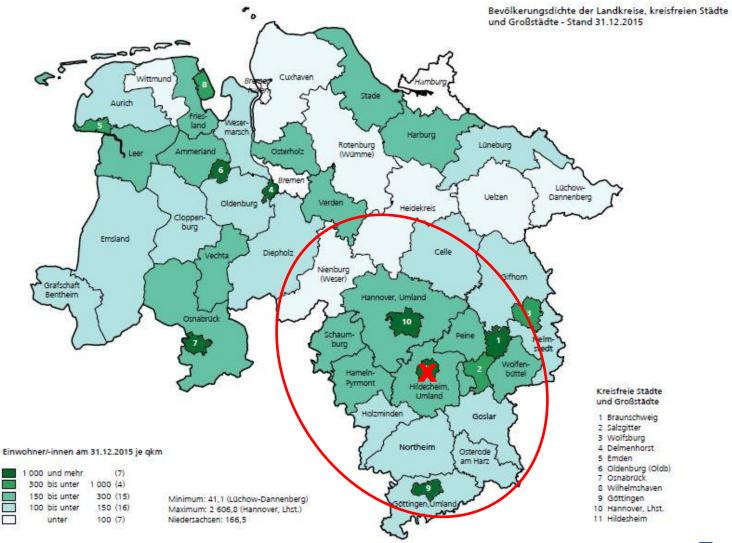




Regionale Perspektive...



- stark landwirtschaftlich geprägte Regionen
- Vielzahl selbstverwalteter, kommunal betriebener kleiner Kläranlagen, wenige regionale Zentren mit Faulung
- vorwiegend qualitätsgesicherte
 landwirtschaftliche Verwertung der
 Klärschlämme
- Agrarregion mit Nährstoffbedarf und zusätzlichem -potential



SATELLITE - Konzept

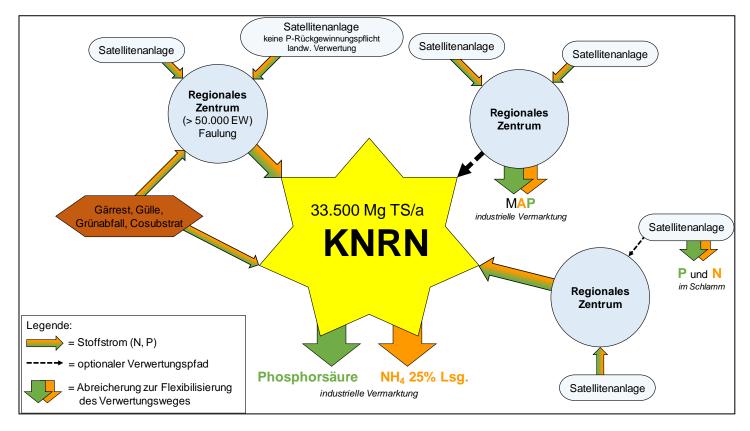






vor- und nachgelagerte Prozesse

- Verfahrensauswahl und Transformation der regionalen KA
- Kläranlagenbetrieb im Gesamtverbund
- Schlammmanagement: Transport und Logistik
- Integration regionaler
 Nährstoffbedarfe und
 -potentiale





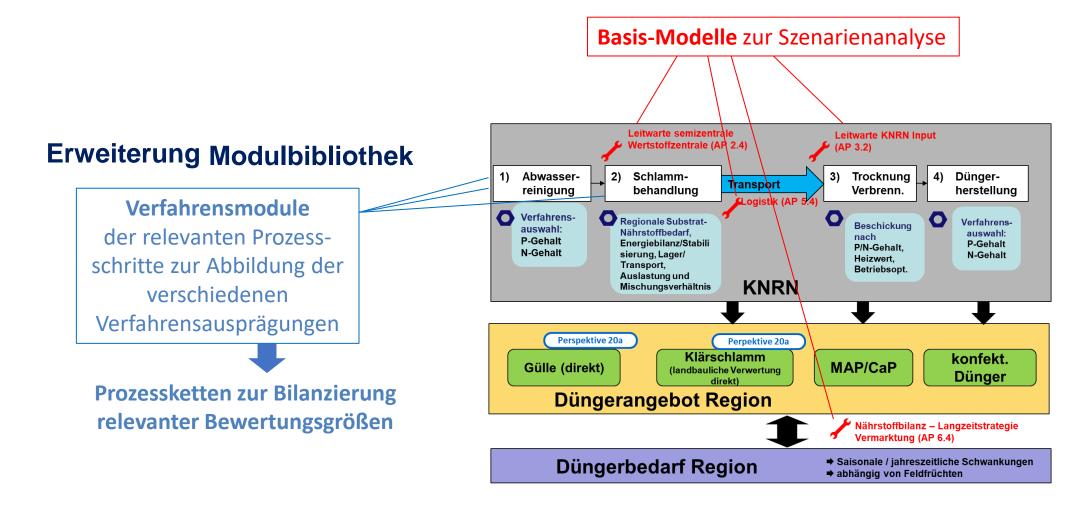
- Zentrale, kommunale Schlammentsorgung
- Anlagenbau und -betrieb Trocknung, Verbrennung



Projektziel: Entscheidungsunterstützung Strategieentwicklung



Methodik: modellgestützte Szenarienanalyse



Wer wir sind...



Moderation: Dr.-Ing. Maike Beier (ISAH) wiss. Leitung und Koordination SATELLITE

Dr.-Ing. Arne Freyschmidt (ISAH) TP Steuerung und Modellierung

Dr.-Ing. Sabrina Breitenkamp (Ingenieurbüro Dr. Breitenkamp), OptiNETZ Tool

Torben Martens (ISAH) TP Energie und regionale Modelle



Dr.-Ing. Maike Beier



Dr.-Ing. Sabrina Breitenkamp



Dr.-Ing. Arne Feryschmidt



M.Sc. Torben Martens

AGENDA

TOP 1 Motivation zur strategischen Investitionsplanung und methodischer Rahmen

TOP 2 ISAH-Modulbibliothek: Überblick über die verfügbaren Verfahrensmodule und Umsetzungsbeispiele

TOP 3 Modellgestützte Strategieentwicklung: Regionale Perspektive und Planung im Verbund

Schlusswort







Eine gute Strategie...



...eine immer weniger deterministische und zunehmend unvorhersehbare und somit in Teilen unplanbaren Umwelt → Notwendigkeit der Weiterentwicklung klassischer Risikomanagement-Instrumente auch und gerade bei der **Planung von Infrastrukturbauwerken**



Merkmale Infrastrukturbauwerken

- Hohe Langlebigkeit der baulichen Elemente
 - → Nutzungsdauer über 30 Jahre
- Sicherung der kommunalen Daseinsvorsorge
 - → Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung, Hochwasserschutz, etc.
- Hohe Investitionssummen
 - → hohe und lange Kapitalbindung
- Öffentliche Hand bzw. Non-Profit-Unternehmen
 - → keine wirtschaftlichen Gewinnziele
 - → überwiegend finanziert durch Gebühren und Steuern





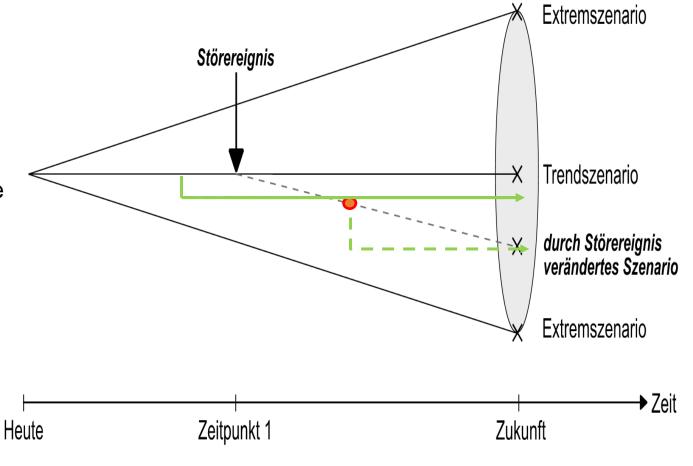
Erhöhte Resilienz durch

Risikobewusstsein/Transparenz:



Berücksichtigung von Unsicherheiten (Trichtermodell)

- ➤ Je weiter man in die Zukunft blickt, desto weiter öffnet sich der Trichter, was bedeutet, dass mit zunehmender Entfernung von der Gegenwart die Unsicherheiten zunehmen.
- Je weiter man sich in die Zukunft entfernt, desto geringer wird der Einfluss der heutigen Situation.
- Durch die Vielzahl an möglichen zukünftigen Entwicklungen der Einflussfaktoren erfolgt eine Begrenzung der Anzahl der Szenarien (praktische Handhabbarkeit).

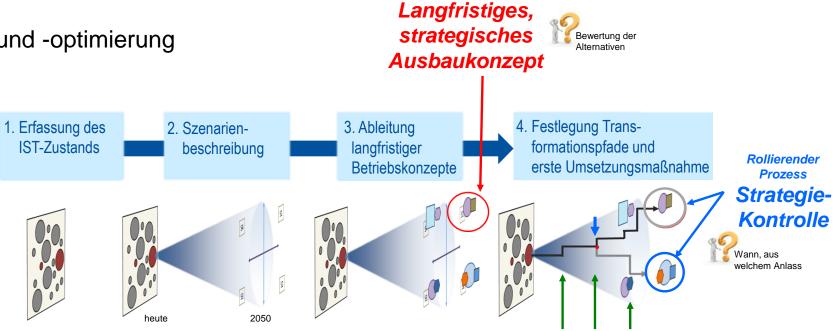




Szenarioanalyse

Satellite

- Anwendungsfelder:
 - Strategische Investitionsplanung
 - Planungsunterstützung
 - Verfahrensvergleiche
 - Bilanzierung
 - Betriebsplanung und -optimierung





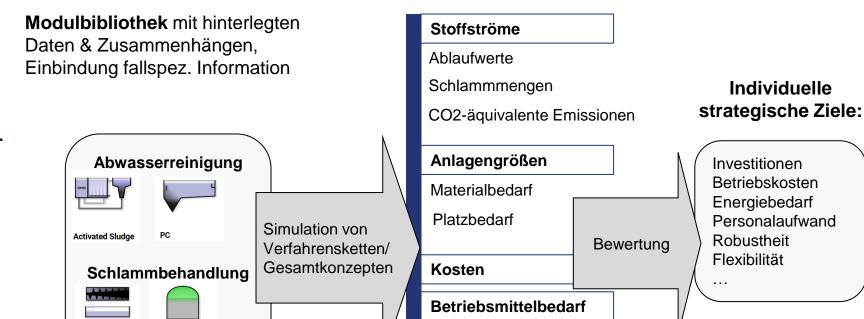


Modelleinsatz zur Investitionsentscheidung



Verfahren

- Deammonifikation
- P-Aufkonzentrierung/ P-Fällung
- Siebtrommel
- aerobe Stabilisierung/ dyn. Schlammalter
- Covergärung/Hochlastfaulung
- Schlammtrocknung
- Stufeneindampfung



Energiebedarf

Strom

Wärme

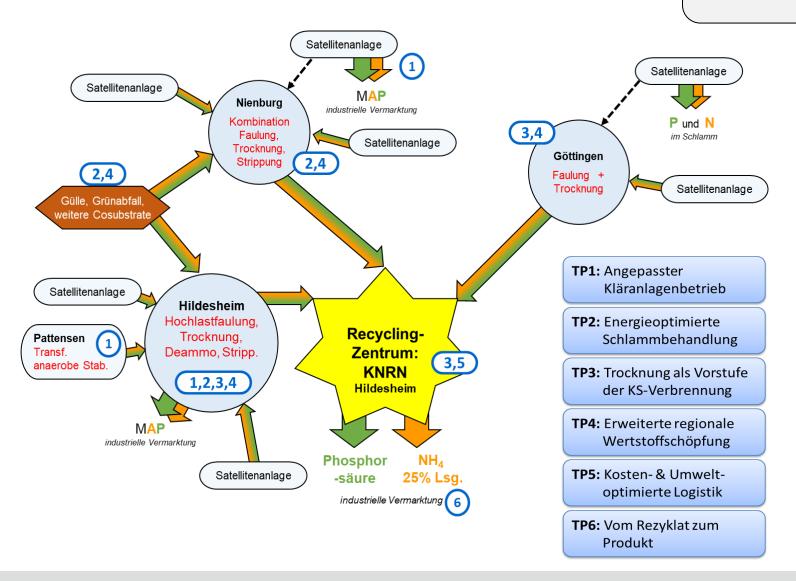
strukturierte Datenbereitstellung & Wissenstransfer fallspezifische Kennzahlberechnung (variable Belastungen, Zukunftsszenarien ...)



Projekt SATELLITE

Investitionsentscheidungen

im Kontext Neuaufstellung P-Rückgewinnungsgebot und Schlammentsorgung



Ausgangssituation KNRN-Verbund

- 38 Kläranlagen
- IST-Zustand Schlamm*
 - ⇒ ca. 121.000 t OS/a
 - ⇒ ca. 25.400 t TM/a
 - ⇒ TR im Durchschnitt 22 %
 - ⇒ Schwankungsbreite von 4,5 bis 85% TR
- Transportentfernungen (Straße) bis ca. 120 km maximal

Bau KS-Monoverbrennung am Standort Hildesheim ausgelegt auf 33.500 t TS/a

*Datenerhebung Stand 2020



Projektziel: Entscheidungsunterstützung



Tools zur Abstimmung der Infrastruktur (Anlagentechnik) und optimierten Stoffstrombewirtschaftung im (kommunalen) Verbund

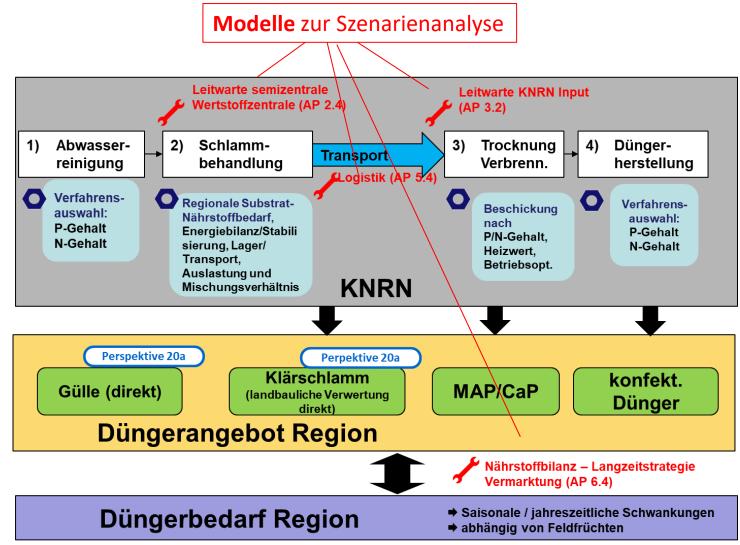
Verfahrensmodule

der relevanten Prozessschritte zur Abbildung der verschiedenen Verfahrensausprägungen (Innovation)



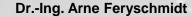
MODUL-ERSTELLUNG

Bsp. und Erläuterung für Modul-Steckbriefe



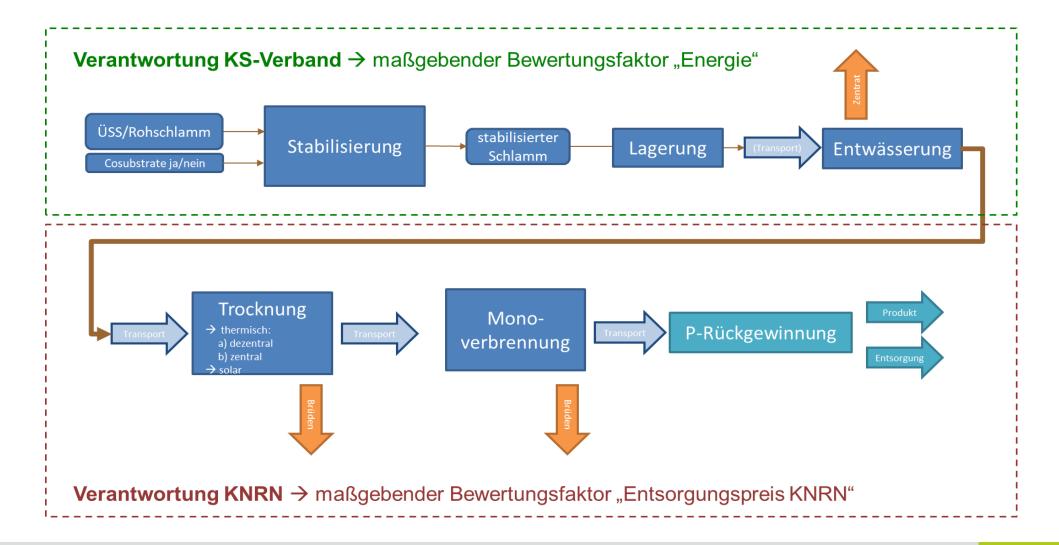






Bewertung und Entscheidungsräume entlang der Verfahrenskette bis zur P-Rückgewinnung







ISAH-Modulbibliothek



Funktionen

Softwareanwendung zur Abbildung und Berechnung von modularen Verfahrensketten statisch oder Zeitreihen

Ergebnisdarstellung (Bilanzen, Zeitreihen, Sankey-Diagramme)
Ergebnisauswertung (Sensitivitätsanalysen, Monte-Carlo-Simulationen, intelligente Optimierung)
Modelle und Ergebnisse können lokal gespeichert werden (Excel)

Vorteile

Untersuchungsergebnisse zur Leistungsfähigkeit von Verfahren werden der Fachöffentlichkeit, insbesondere potentiellen Anwendern, zugänglich gemacht → weitere Nutzung der Ergebnisse
Zugehörige Publikationen, Abschlussberichte, Unternehmenswebseite etc. werden entsprechend verlinkt Einfache Variantenvergleiche → Entscheidungsunterstützung bei Planung und Betrieb durch einfach zu handhabende Werkzeuge

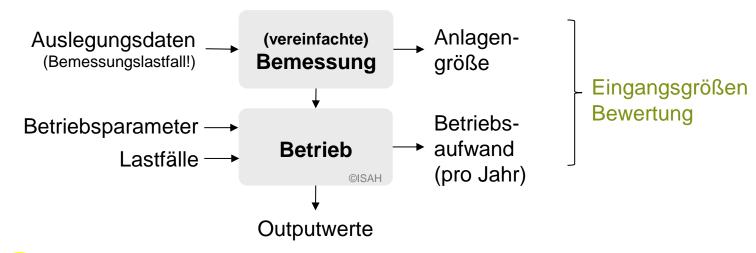
Verfahrensmodule werden gebündelt an einem Ort in einem Format gesammelt

→ zunehmende Auswahl an Verfahrensmodulen ermöglicht die Abbildung immer komplexerer Prozessketten



Aufbau Verfahrensmodule







verfahrensspezifisch

- vereinfachtes Bemessungsschema
- typische Auslegungswerte
- Berechnungsschema für Outputströme
- zulauf- und abbauspezifische Verbräuche und Reststoffanfall

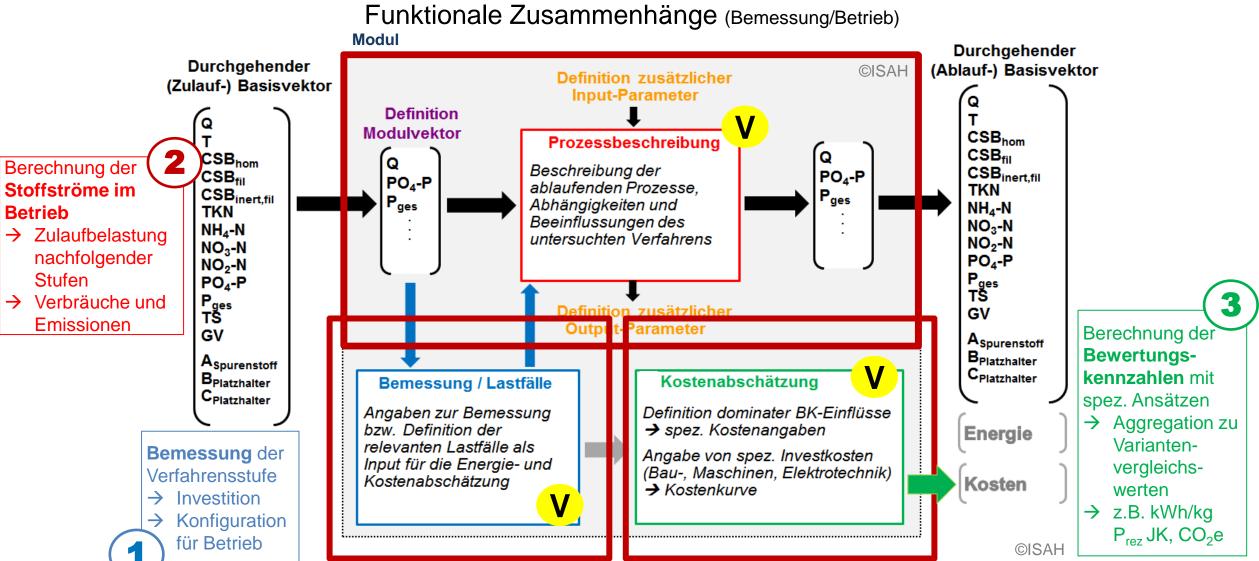
fallspezifisch

- Inputdaten (als Lastfälle)
- spez. Aufwand/ Auswirkungen/... für Betriebsmittel, Reststoffentsorgung etc.



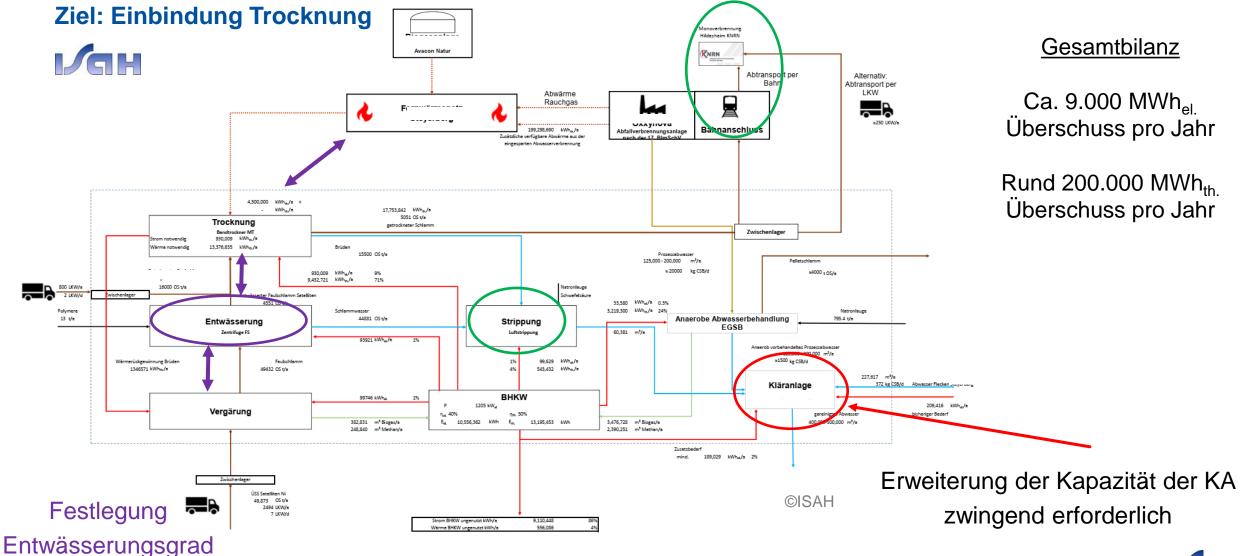
Modellkonzept = über Basisvektor gekoppelte Module





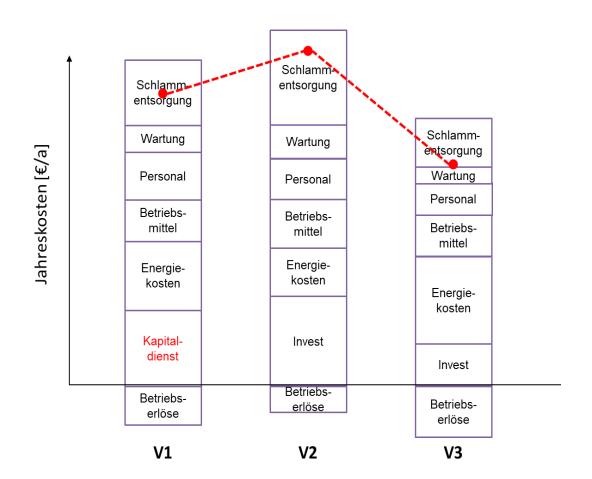
Energiebilanzmodell - Dezentrale Schlammbehandlung

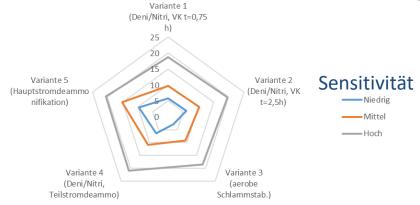




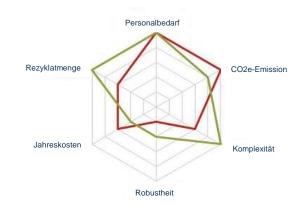
Bewertungsergebnis Jahreskosten







Mehrparameter



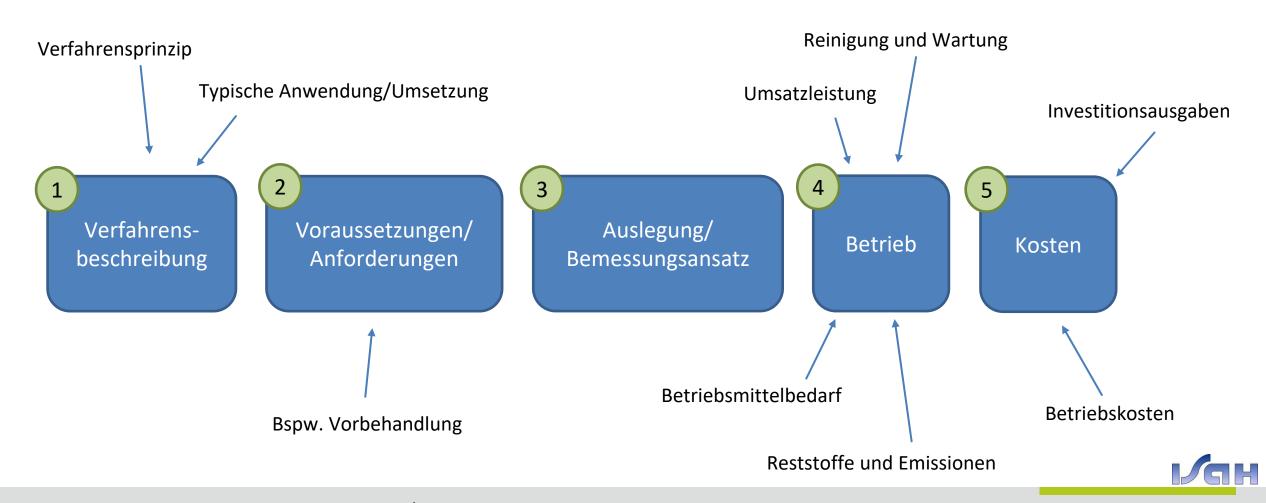
Dashboard



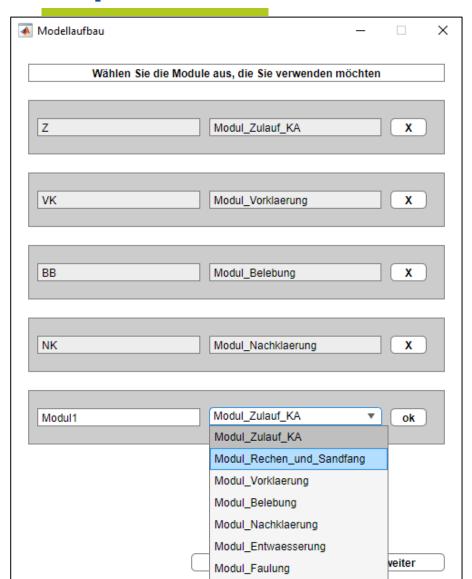
Verfahrenssteckbrief

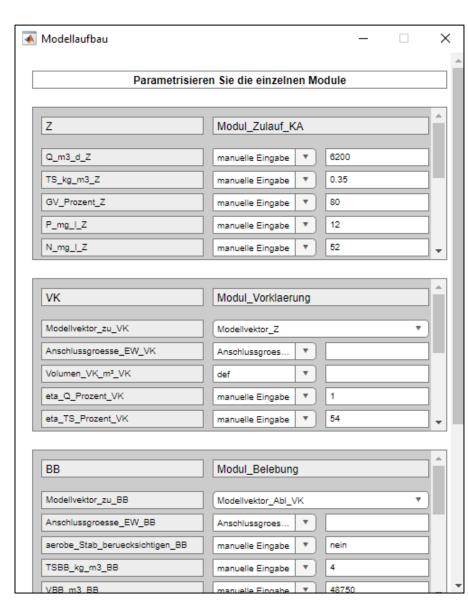


Der Verfahrenssteckbrief ist in fünf Themenbereiche gegliedert:



Impressionen







verfügbare Module

Zulaufpumpwerk

Rechen/Sandfang

Vorklärung

Belebung

Belüftung Luft/ Reinsauerstoff

Nachklärung

Eindickung/Entwässerung

Faulung

BHKW

Ozonung

Deammonifikation

Hydrolyse

MAP-Fällung

Elektrolyse

Einzugsgebiet

Industrieeinleiter

Module im Aufbau

Aktivkohle

Trocknung

Verbrennung



Grundidee der Modulbibliothek und Definitionen



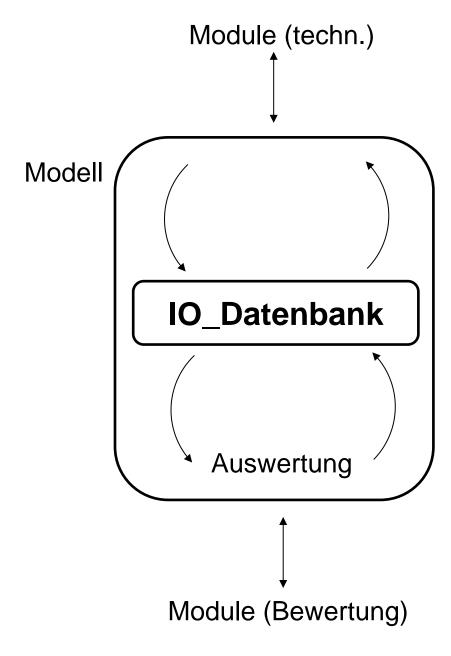
Zusammenfassen und Veröffentlichen von entwickelten Verfahren der Siedlungswasserwirtschaft in Form eines Moduls mit zugehörigem Steckbrief

- **Steckbrief**: schriftliche <u>Zusammenfassung der Grundinformationen</u>, der <u>Ein- und Ausgangsparameter</u>, sowie der stattfindenden <u>Prozesse zur Transformation</u> der Eingangsparameter in die Ausgangsparameter
- Verfahrens-Modul: <u>Recheneinheit</u>, die ein spezifisches Verfahren auslegt und Eingangsparameter in Ausgangsparameter transformiert
- Modulausprägung: <u>durch Verfahrensgeber</u> zu unterscheidende Verfahrensausprägungen (z.B. besonders energetisch optimiert, spez. Wirkungsgrade...)
- Modell: Beliebige <u>Kombination mehrerer Module</u> zur Abbildung von Verfahrensketten
- Parametrisiertes Modell: auf einen Anwendungsfall spezifiziertes Modell



Ansatz





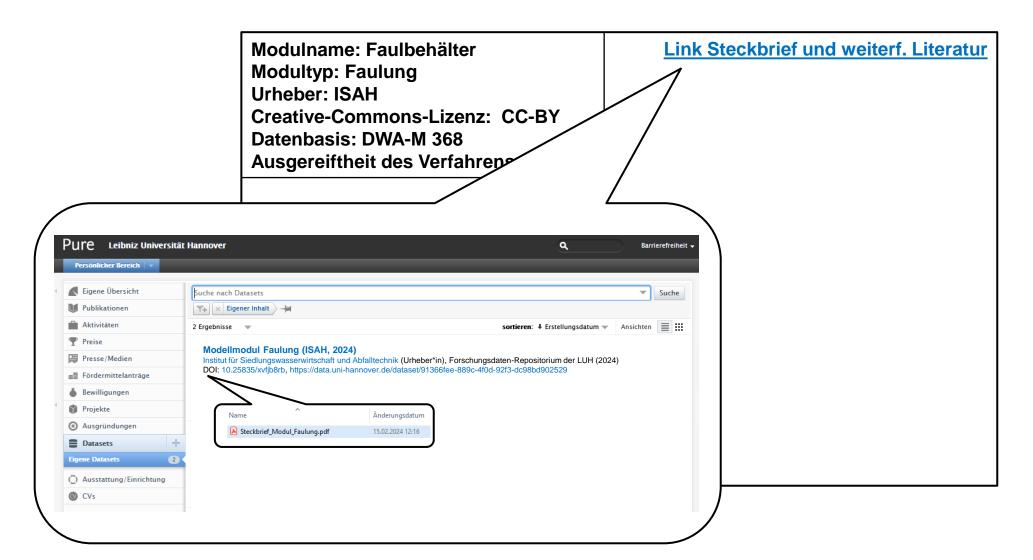
IO_Datenbank enthält alle Inputs (Modulparameter und Verknüpfungen) und Outputs (Ergebnisse) für die Modellierung) für eine beliebige Anzahl an Simulationsschritten

Jedes Element in der Datenbank kann eindeutig über Attribute adressiert werden

- → Standardisierung der Modulerstellung
- → erweiterte Auswertemöglichkeiten

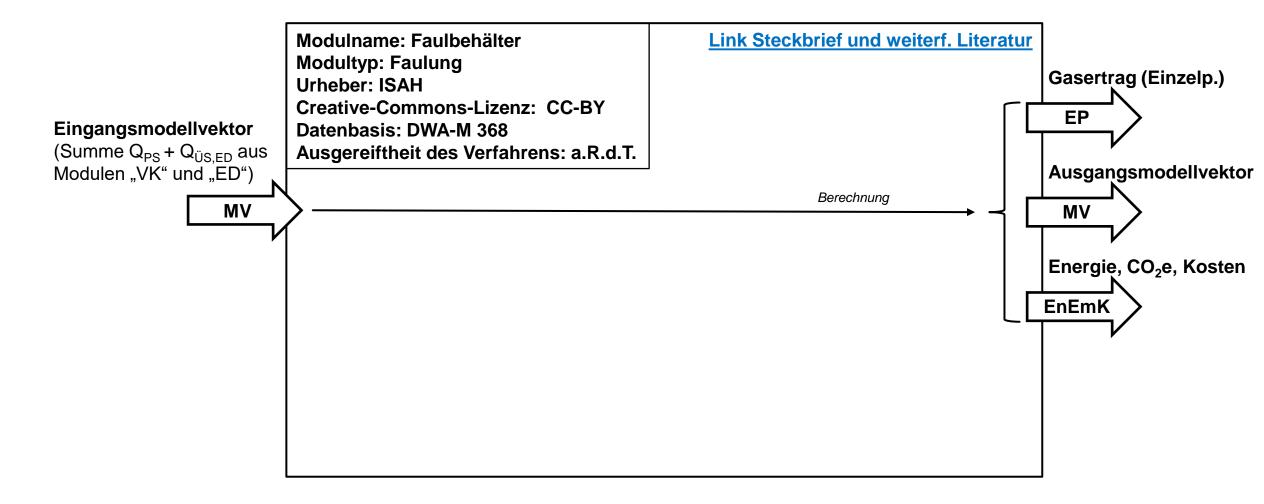












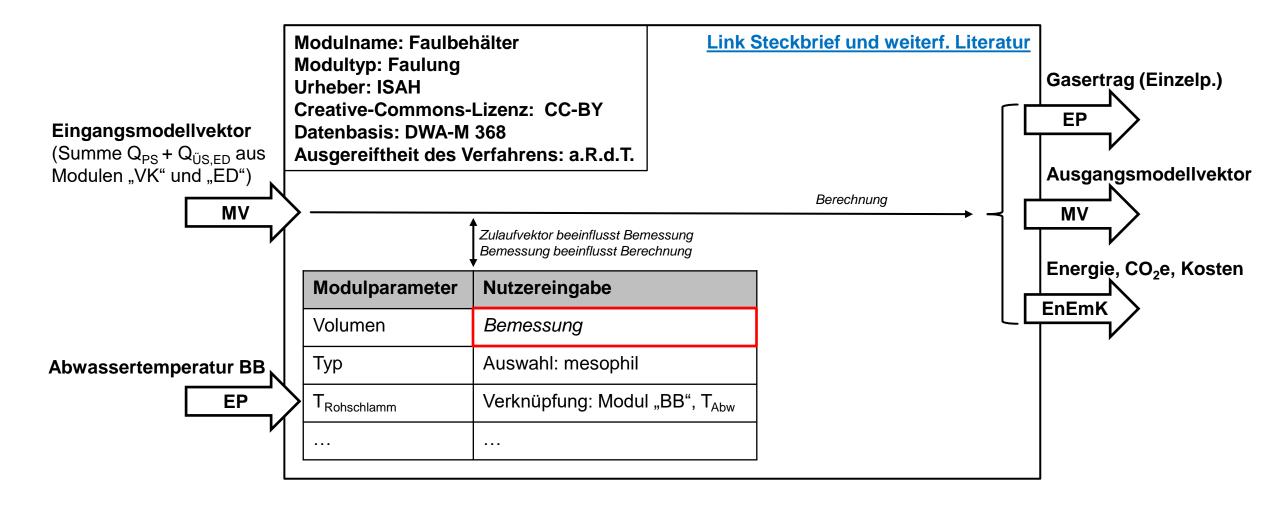
















Im vorliegenden Beispiel wurde ausgewählt, dass das Volumen der Faulbehälter bemessen werden soll.

- Im Algorithmus werden zwei Bemessungskriterien definiert:
 - Stabilisierungszeit $t_{St} > 20 d$ $\rightarrow V_{FB.1} > Q_{FS} \times 20$

$$\rightarrow V_{FB.1} > Q_{FS} \times 20$$

- Raumbelastung $B_{R.oTS} < 1.5 \text{ kg oTS/m}^3/d \rightarrow V_{FB,2} > M_{oTS,zu} / 1.5$
- gewähltes Volumen: $V_{FB} = max(V_{FB,1}; V_{FB,2})$

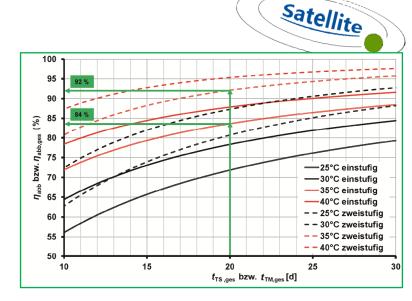
Aus dem Volumen ergeben sich schließlich die Abbauraten für CSB und oTS:

$$V_{FB} \rightarrow t_{Aufenthaltszeit} \rightarrow \eta_{CSB,abb} + \eta_{oTS,abb}$$



Es werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- Abbau oTS → Abbaugrad in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit
- Abbau CSB_{abb} → Abbaugrad in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit
- Rücklösung von in die Biomasse eingebautem Stickstoff → NH₄-N
- Rücklösung von in die Biomasse eingebautem Phosphor → PO₄-P
- Faulgasertrag in Abhängigkeit des umgesetzten CS



• Energie:

- Berücksichtigung Strombedarf
- Berücksichtigung Wärmebedarf (Schlammaufheizung + Abstrahlungsverluste)

• Emissionen:

- Indirekte Emissionen z.B. durch Strombedarf und Betriebsmittel (Fe-Dosierung...)
- Direkte Methanemissionen (Undichtigkeiten, Druckabnahme im Ablauf der Faulung)

Kosten:

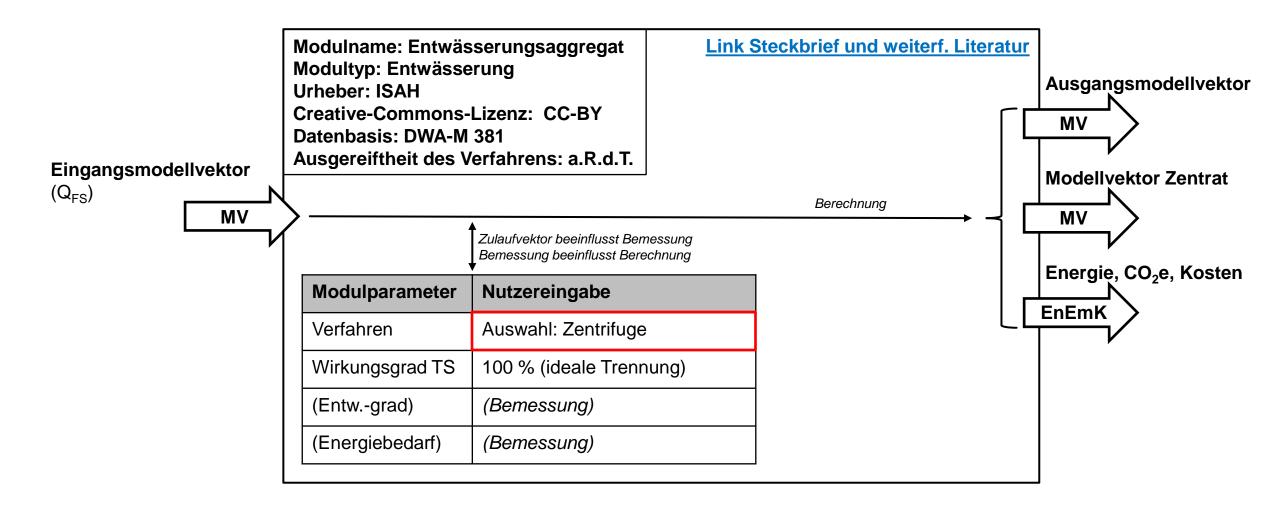
- Invest aus Bemessung
- Betriebskosten aus Verbrauch















Verfahren	Energiebedarf [kWh/kg oTS/d]	Entwässerungsgrad [%]
Schwerkrafteindickung (offen)	5	5
Schwerkrafteindickung (abgedeckt)	5	5
Zentrifuge	75	25
Bandfilter	45	24
Kammerfilterpresse	65	33
Schneckenpresse	30	25

Hier: Kennwerte für Basisverfahren

Es können weitere Verfahren ergänzt werden.

 Beispiel Schneckentrockner Biorestec: Verfahrensinnovation ist der stufenweise Abzug der Brüden

Beim Modul "Entwässerung" muss ein Verfahren ausgewählt werden. Der Energiebedarf sowie der Entwässerungsgrad werden anschließend automatisch gemäß obenstehender Tabelle festgelegt.

- Energiebedarf: 75 kWh/kg oTS/d
- Entwässerungsgrad: = 25 %





Im Modul "Entwässerung" wird ein Volumenstrom in seine gelösten (Zentrat) und partikulären (entwässerter Schlamm) Komponenten aufgeteilt.

- Volumenstrom entwässerter Schlamm: $Q_{entwS} = TS_{zu} / TS_{ab} \times Q_{FS}$
- Gelöste Stoffe S_i werden proportional auf das Zentrat und den entwässerten Schlamm aufgeteilt
- Partikuläre Stoffe X_i werden gemäß dem gewählten Wirkungsgrad η_{TS} aufgeteilt
 - hier Wirkungsgrad TS = 100 % → ideale Trennung, alle partikulären Stoffe im entwässerten Schlamm

Energie:

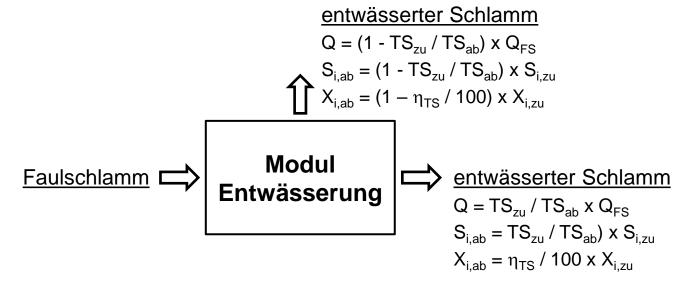
Berücksichtigung Strombedarf

Emissionen:

- Indirekte Emissionen durch Strombedarf
- Direkte Methanemissionen bei offenen Eindickern

Kosten:

- Investitionskosten
- Stromkosten





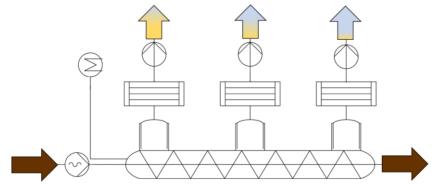
Innovative Stickstoffrückgewinnung



<u>Verfahren:</u> KS-Trocknung mit sequenzieller Stickstoffrückgewinnung (BIORESTEC GmbH)

- Ausnutzung des höheren Sättigungsdampfdrucks von Ammoniak durch einen örtlich "frühen" Abzug einer ersten Brüdenfraktion
- Betrieb einer halbtechnischen Versuchsanlage am Standort Hildesheim (regionales Zentrum)
- Verschiedene Betriebstemperaturen und Durchlaufgeschwindigkeiten (Nmax: ca. 40 g/l)
 - Modul zur Vortrocknung auf ca. 35 % TR
 - N-Entfrachtung um ca. 60 %
 - Produkt: Ammoniaklösung mit 25 % N



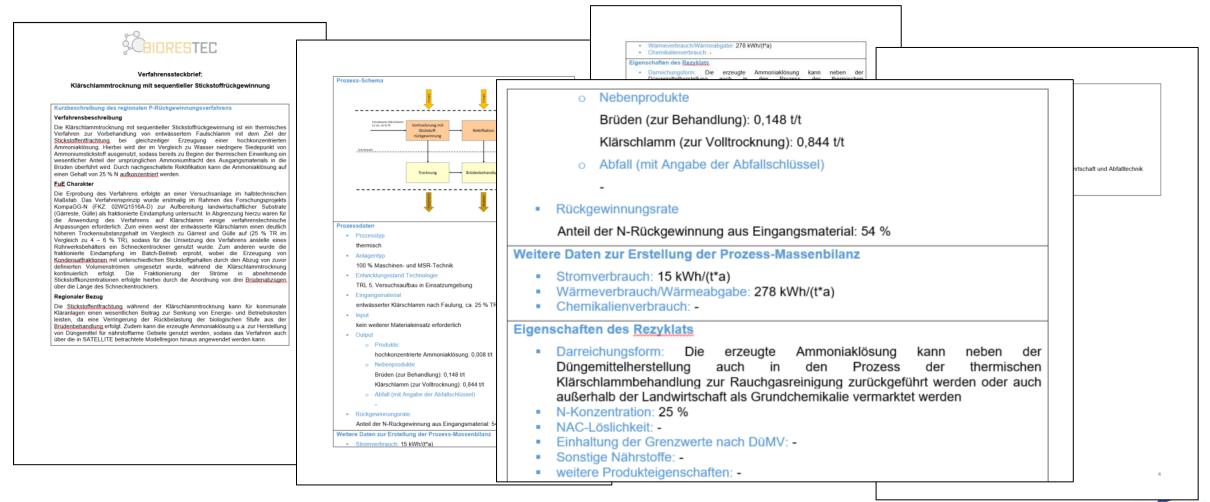




RePhoR Verfahrenssteckbriefe



RePhoR-Steckbrief für sequentielle Stickstoffrückgewinnung (BIORESTEC)



Modellmodule SATELLITE – BIORESTEC



Im Basismodul "Biorestec" werden folgende Prozesse berücksichtigt:

- N-Rückgewinnung
- Klärschlammtrocknung

Außerdem Energie:

- Berücksichtigung Strombedarf
- Berücksichtigung Wärmebedarf

Emissionen:

Indirekte Emissionen durch Strom- und Wärmebedarf

Und Kosten:

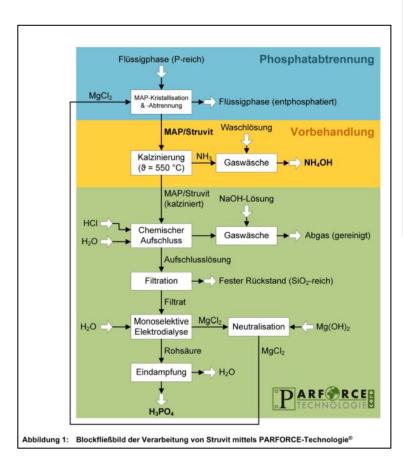
- Investitionskosten
- Betriebskosten (Energie, Personal)

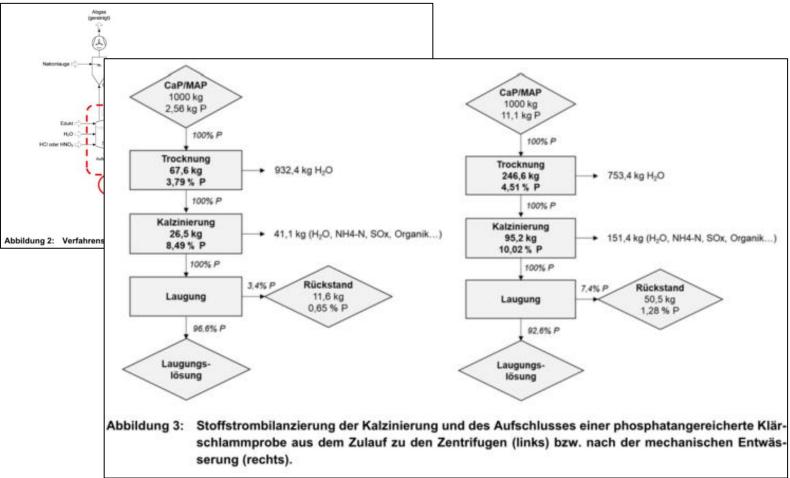


Verfahrenssteckbrief PARFORCE (aus Schlamm)



Ausschnitte aus dem Modulsteckbrief des PARFORCE-Verfahrens (PARFORCE)







Alternative Verfahrenssteckbriefe



• Ausschnitte aus dem Modulsteckbrief des PARFORCE-Verfahrens (PARFORCE)

	P min	P mittel	P max
P [Gew%]	7,8	9,3	10,8
/erbrauchs- und Inputmengen			
[kg/1.000 kg KSA]			
(alzinierungsrückstand (KRS) [kg]	1.000	1.000	1.000
Einsatz Salzsäure (36 %ig)	1.864	1.791	1.718
für Aufschluss, IAT 1, IAT 2			
Verbrauch H₂O	5.258	5.171	5.085
Energieverbrauch			
[kWh/1.000 kg KSA]			
Elektrische Energie	272	252	236
für Elektrodialyse,			
Eindampfung P-Säure			
Dampf/Wärme ====	411	411	411
Eindampfung P-Säure			

Tabelle 6:

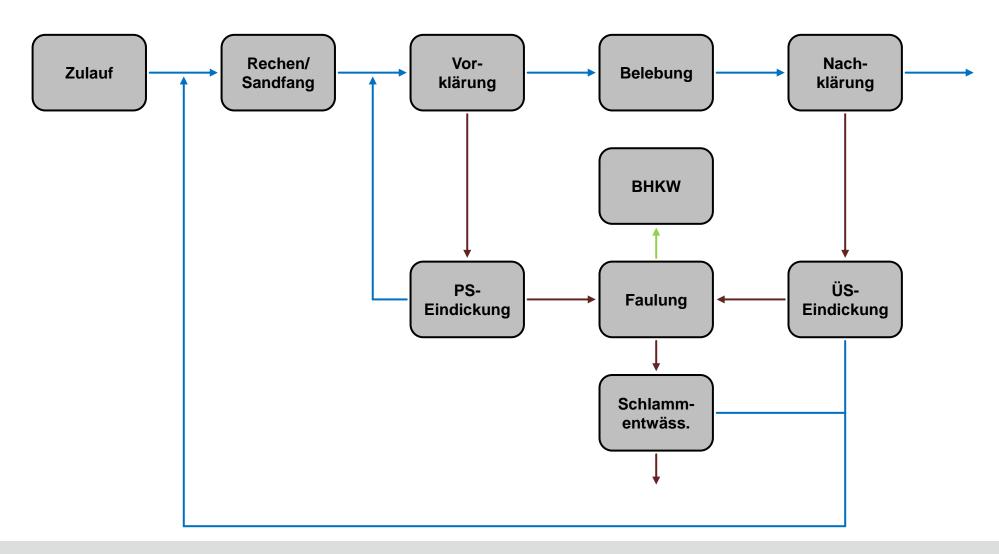
Tabelle 7:	Zusammensetzung 1.000 kg Kalzinieru	der variablen Betriebsk ngsrückstand	ostenbestandte	eile in Abhängigk	eit des F-Gehal
Kostenbes	standteil	Einheit	P min	P mittel	P max
	g ² für Aufschluss eration IAT 1 & 2	[€/1.000 kg KRS]	93,19	89,53	85,88
Netto H ₂ O ³	1	[€/1.000 kg KRS]	4,07	4,15	4,22
Elektr. Stro	om ⁴	[€/1.000 kg kRS]	54,39	50,42	47,21
Wärme mit	Rückgewinnung ⁵	[€/1.000 kg KRS]	16,43	16,43	16,43
Entsorguno (feucht)6	g silik. Rückst.	[€/1.000 kg кrs]	47,94	47,97	48,00
Anteilig ver	brauchte IAT ⁷	[€/1.000 kg kRs]	2,42	2,33	2,24
Abwasser8		[€/1.000 kg KRS]	0,31	0,31	0,31
	osten je 1.000 kg ngsrückstand	[€/1.000 kg _{KRS}]	218,75	211,14	204,29
Variable K H₃PO₄ (75	osten je 1.000 kg %ig)	[€/1.000 kg _{H3PO4}]	772,97	624,67	521,15
Variable K Schlamm	osten je 1.000 kg OS*	[€/1.000 kg os]	20,82	20,10	19,45

nic c. Lucaninioniacoung aci Carpaniongen		015	
	P min	P mittel	P max
P [Gew%]	7,8	9,3	10,8
Outputmengen [kg/1.000 kg KRS]			
Phosphorsäure 75 %ig [kg/1.000 kg KRS]	283	338	392
Kondensat aus Eindampfung	2.413	2.294	2.175
Regenerat aus IAT 1 [kg/1.000 kg KRS]	1.678	1.624	1.569
Regenerat aus IAT 2 [kg/1.000 kg KRS]	1.133	1.078	1.024
Silik Rückstand (feucht) [kg/1 000 kg KRS]	959	959	960



Beispiel: P-Rückgewinnung auf der KA Hildesheim

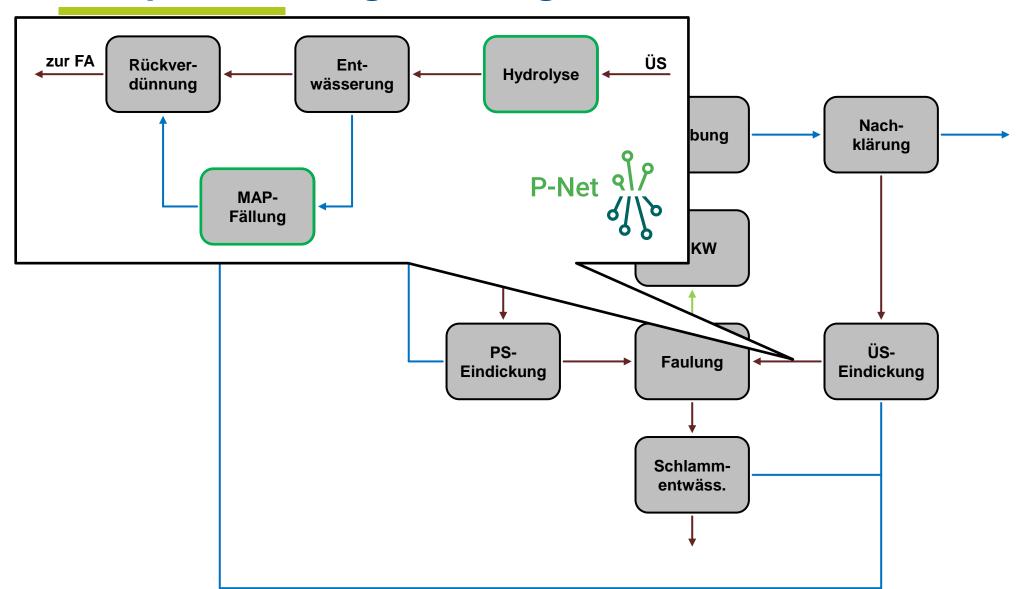






Beispiel: P-Rückgewinnung auf der KA Hildesheim



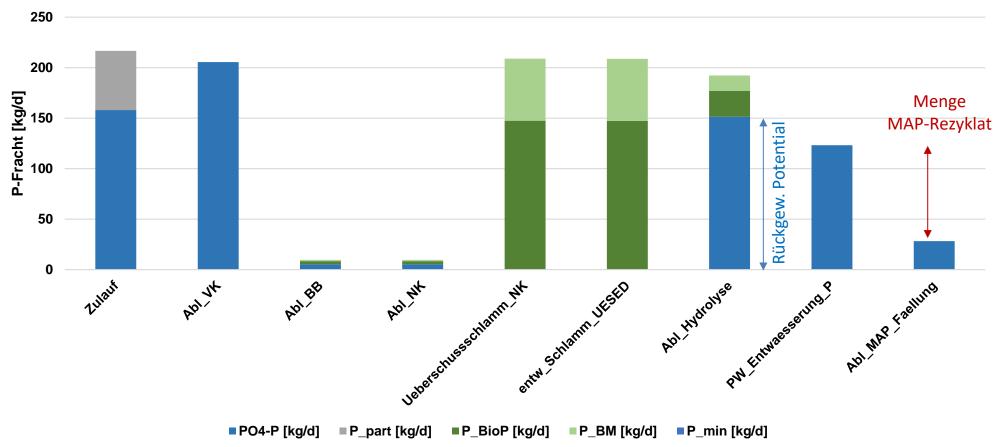






Beispiel: P-Rückgewinnung auf der KA Hildesheim





- Rückgewinnungspotential: 96 % v. P_{zu}
- Als MAP rückgewonnen: 44 % v. P_{zu}



Modulbibliothek

Verfahrensspezifische Kennzahlen

→ Zusammenstellung + Hinterlegung in den Modulen

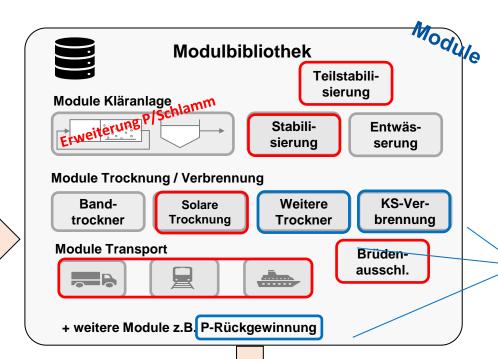
Zum Beispiel:

- Reinigungsleistung/Wirkungsgrade/ Abbaugrade
- P-Rückgewinnungsquote
- spez. Strombedarf [kWh/kg Durchsatz]
- spez. Wärmebedarf [kWh/kg Wasserverdampfung]
- · spez. Betriebsmittelbedarf [kg/m³ Schlamm]

Standort- bzw. betriebsspezifische Kennzahlen und Informationen

Zum Beispiel:

- P-Eliminationsverfahren
- Entwässerungsgrad
- Schlammmengen und -qualitäten (TR, oTR, P-Gehalt, Heizwert, ...)
- spez. Kosten (Strom, Wärme,...)
- CO₂e Strommix [g CO₂e/kWh]
- Invest, Abschreibungszeiträume
- Vorhandene Anlagentechnik
- Entfernungen, Verkehrsanschluss









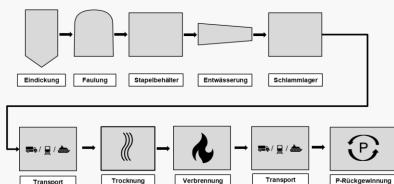




RePhoR-**Partner**

Steckbriefe/Statusbericht





Modellunterstütze Szenarienanalyse











Bilanzraum. **Bewertung Problem** Modell-Ziel(e) **Alternativen** Bezugsgrößen, Bilanzierung und definieren definieren definieren Bewertungskrit., bildung **Auswahl** -verfahren Wir brauchen eine neue Was ist die Aufgabenstellung? Entwässerung: Welche? Welches P-Wir verwerten Schlamm Rückgewinnungskonzept zukünftig thermisch. ist das richtige für uns? Lohnt sich der Bau einer **Trocknung?**



Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, Bezugsgrößen, Bewertungskrit., -verfahren

0

Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl



Was sind die wesentlichen Ziele? Was wollen wir erreichen?





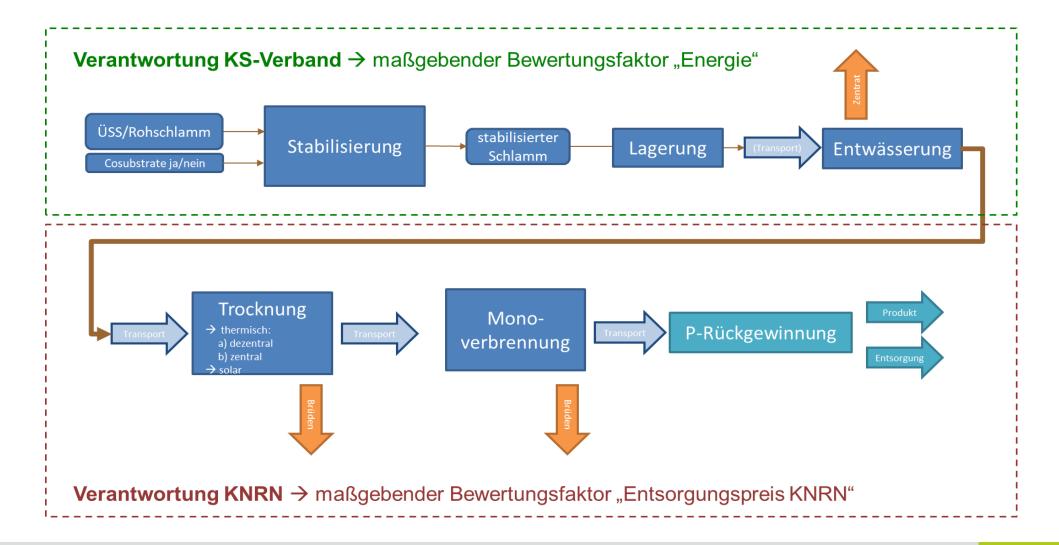
Wirtschaftlichkeit allein reicht nicht mehr...

... auch noch Energieeffizienz maximieren, CO₂e-Fußabruck minimieren...



Bewertung und Entscheidungsräume entlang der Verfahrenskette bis zur P-Rückgewinnung









Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, Bezugsgrößen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

Bilanzierung

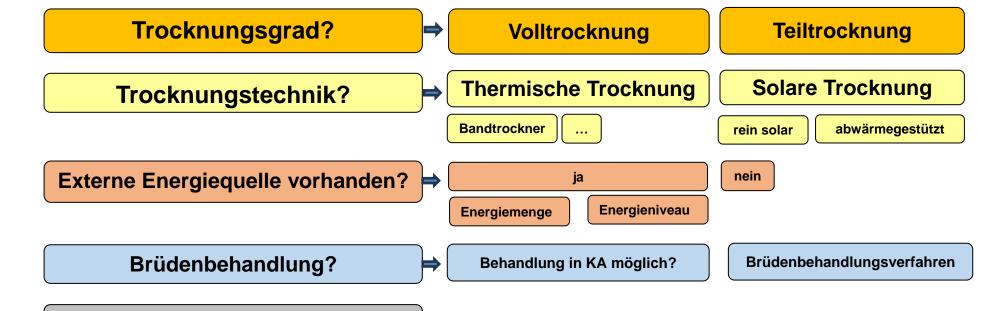
Bewertung und Auswahl



Platzbedarf?, ...

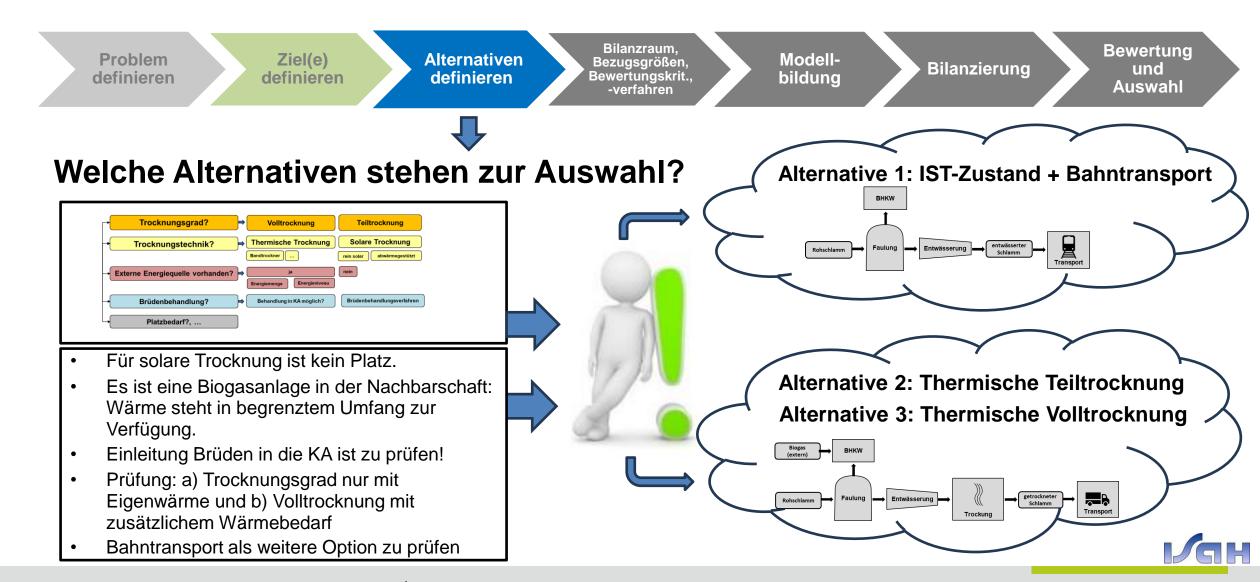
Welche Alternativen stehen zur Auswahl?













Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, Bezugsgrößen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl

Auswahl Bewertungsverfahren

Wie will ich bewerten?

- Ökonomische Bewertungsverfahren: Dynamische Kostenvergleichsrechnung, Kosten-Nutzen-Analyse
- Ökologische Bewertungsverfahren: Ökobilanz, Lebenszyklusanalyse (Life-Cycle-Analysis LCA)
- Umweltverträglichkeitsprüfung
- Risikoanalysen
- Strategische Planungsansätze (z.B. Szenarioanalyse → strategische Investitionsplanung)
- Benchmarking/Kennzahlbildung
- Multikriterielle Bewertungsverfahren: Bewertungsmatrix, Entscheidungsunterstützungssysteme

• ...





Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, -größen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

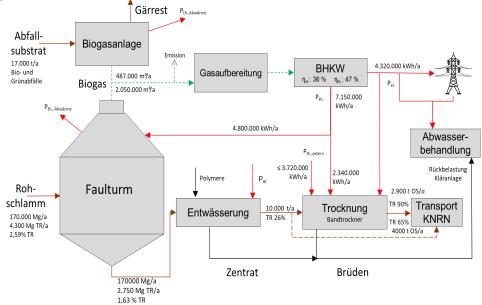
Bilanzierung

Bewertung und Auswahl

Was soll bewertet werden?



- Energiebilanz (externe Wärme?!)
- Investitionskosten (€/a)
- Entsorgungskosten (€/a nach OS)
- THG-Emissionen (CO₂e)
- Flexibilität/Betrieb in Kombination mit KNRN







Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, -größen, Bewertungskrit., -verfahren

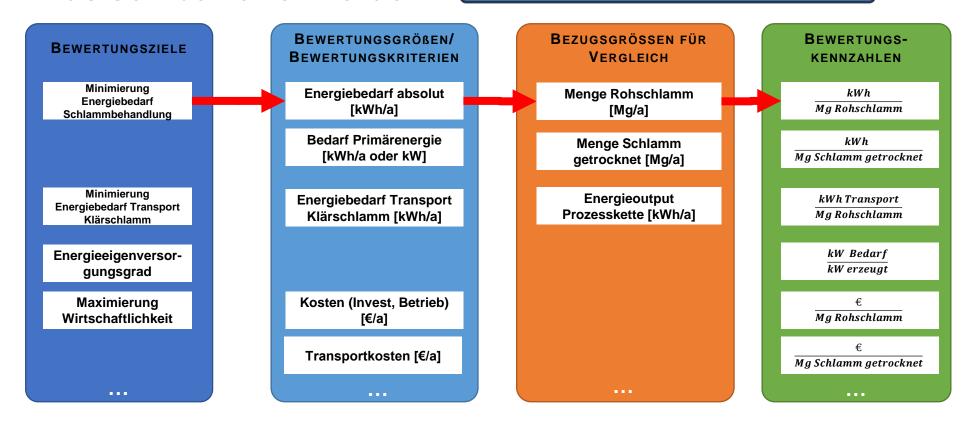
Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl

Was soll bewertet werden?

Beispiele Kennzahlbasierter Ansatz







Problem definieren

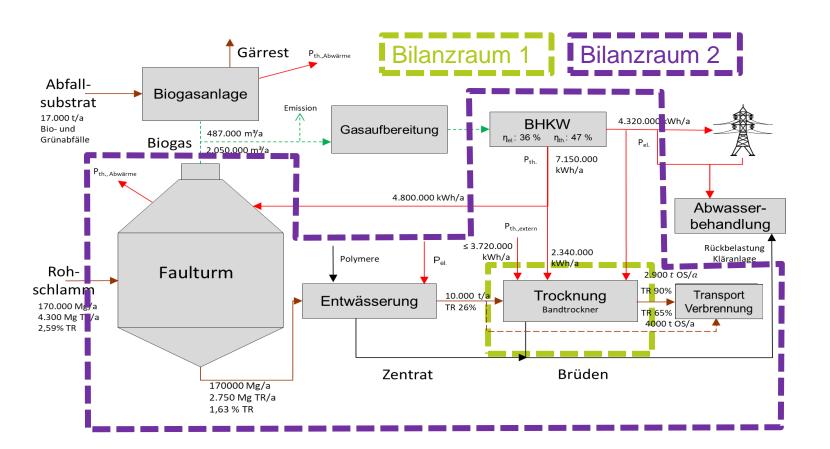
Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, -größen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl



Wahl des Bilanzraums

Ergebnis abhängig von der Wahl der Bilanzgrenzen!

Rückkopplung zur Zielsetzung:

→ Wahl des Bilanzraums

zugeschnitten auf
Fragestellung!





Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

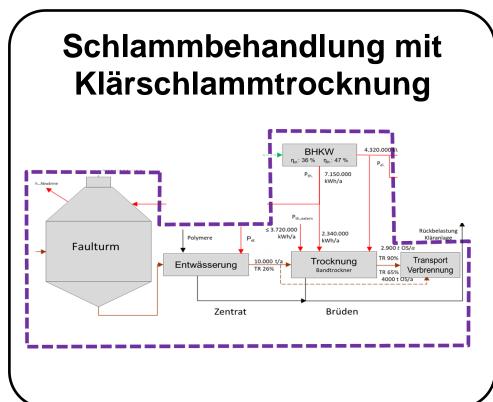
Bilanzraum, -größen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl

Rohschlamm **Polymere Biogas (extern)** Treibstoff (Diesel) ggf. Wärme (extern)



Bilanzierungsgrößen

Getrockneter KS

Brüden

Zentrat

el. Energie

- → Massenbilanz
- → Energiebilanz
- → CO₂e-Bilanz
- → Kostenberechnung



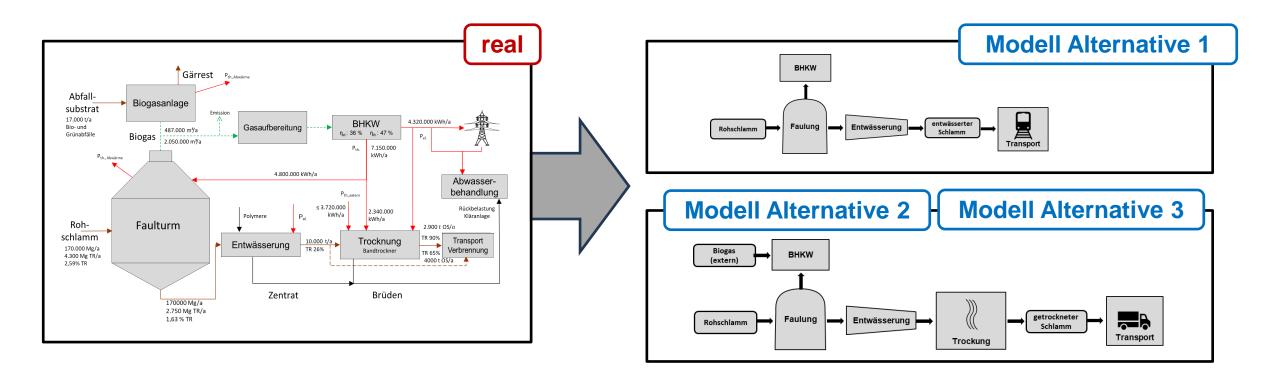
Konzept modellgestützte Bewertung



Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl







Problem definieren

Ziel(e) definieren Alternativen definieren

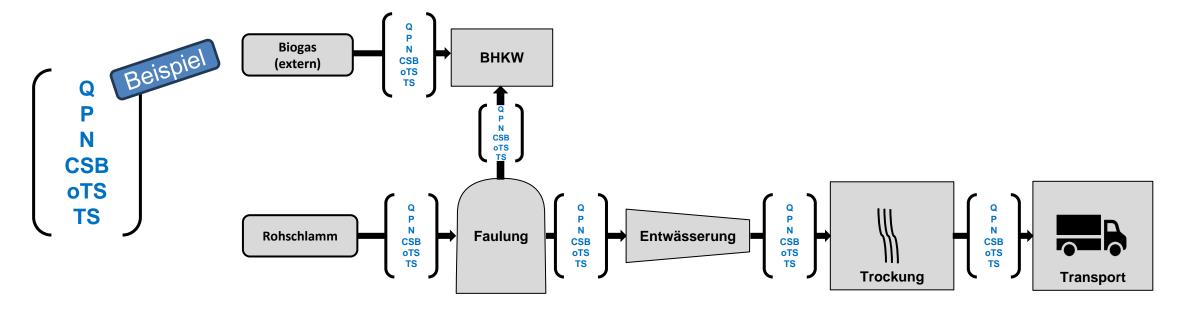
Bilanzraum, Bezugsgrößen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

Bilanzierung

Bewertung und Auswahl

→ Kopplung der Verfahrensschritte über einheitlichen Basisvektor







Problem definieren

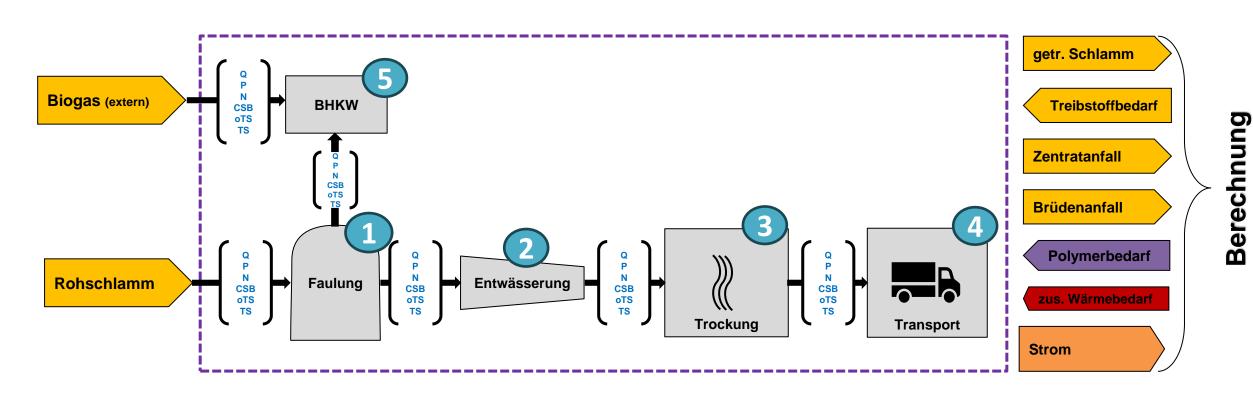
Ziel(e) definieren Alternativen definieren

Bilanzraum, Bezugsgrößen, Bewertungskrit., -verfahren

Modellbildung

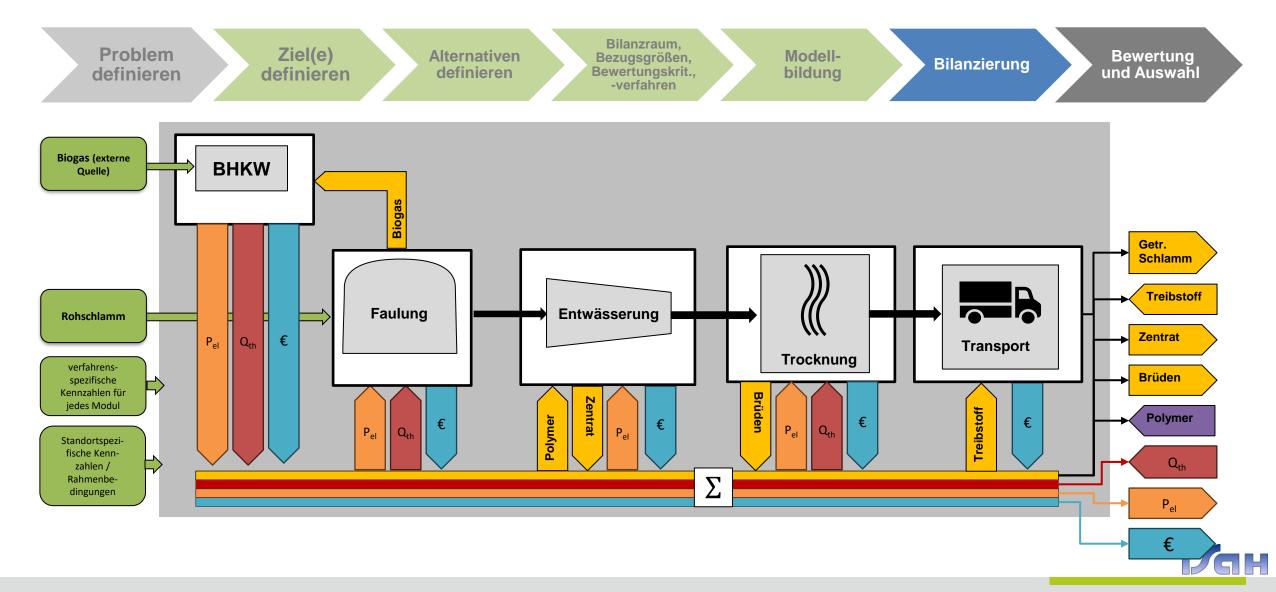
Bilanzierung

Bewertung und Auswahl















Beeinflussung Heizwert





Schlammursprung
Vorklärung (t_R) ↑
Belebung (C_{CSB,ZB}) ↓
Co-Substrat (M_{oTS})↑

Stabilisierung Aerob (t_{TS,aerob})↓ Anaerob (t_{TS,aerob}) & Abwärme ↑ Feststoffgehalt Entwässerung (Δ TR) \uparrow Trocknung (Δ TR) \uparrow

Modellaufbau Verfahrensmodule

Bilanzierung



Anpassung Heizwert Trocknung





Nutzung Gaspotentiale

- Co-Substrate
- Kompostwerk Gas

Abwärme BHKW

Nutzung Industrieabwärme

- HT-Wärme (Müllverbrennung)
- NT-Wärme

Abwärme Industrie

Trocknung

Ziel: Heizwerterhöhung

Bsp.: SATELLITE KNRN Verbund

Abwärmegestützte solare KS-Trocknung

- ansässiges Industrieunternehmen
 - NT-Abwärme > 20.000.000 kWh/a
- Trocknungspotential Unterverbund (alle 310.000 EW)

Erhöhung Trocknungsgrad Gasnutzung Kompostwerk

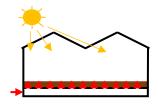
- Kommunaler Entsorgungsbetrieb → Kompostwerk
 - Verstromung zusätzl. Biogas (Rotte)
- ➤ Erhöhung Abwärmemenge → Trocknungsgrad ↑

Erhöhung Abwärmemenge Co-Substrate

- Nutzung industrieller Abwässer als Co-Substrate in Faulung ...
 - Ausnutzungsgrad Faulung ↑
 - ➤ Erhöhung Gasmenge → Abwärmemenge ↑
- ... oder gesonderter Behandlung (Bsp. EGSB)
 - ➤ Erhöhung Gasmenge → Abwärmemenge

Nutzung HT/MT Abwärme

- Nutzung Abwärme Müllverbrennung für KS-Trocknung
 - > Trocknung ca. 25.000 t OS_{entw.}/a



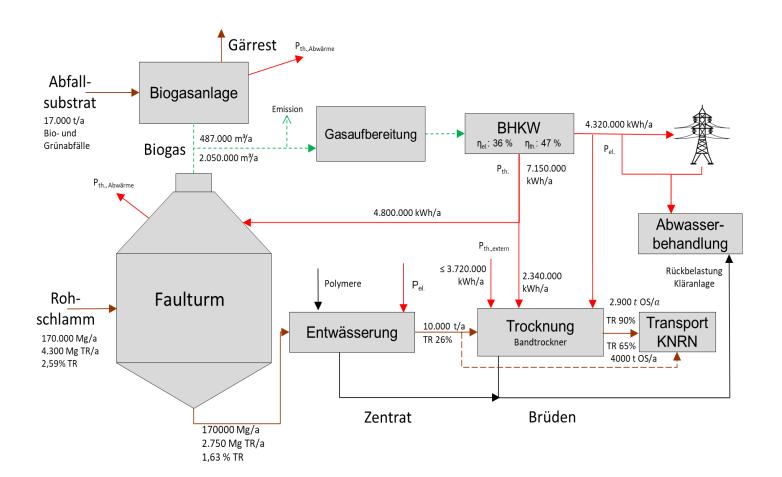






Beispiel Kläranlage Göttingen: Alternativen zur Bewertung





Alternative 1:

- → keine Schlammtrocknung
- → Schlammtransport per Bahn

Alternative 2

thermische Teiltrocknung mit zur Verfügung stehender Eigenwärme

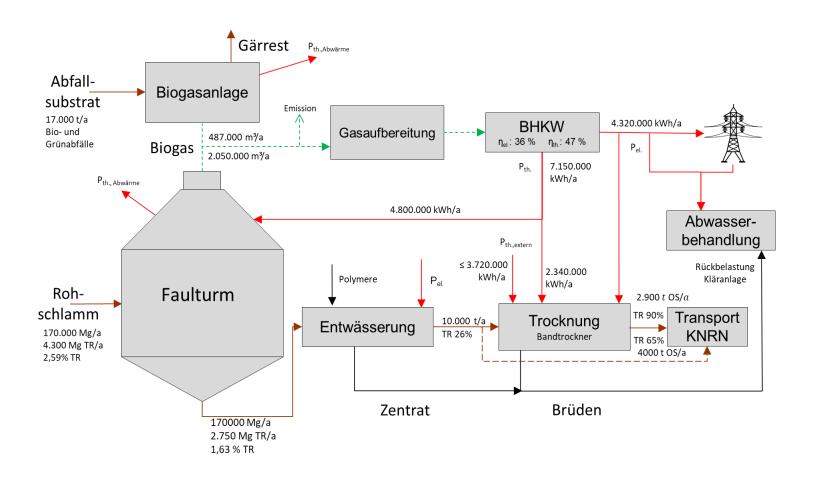
Alternative 3

→ thermische Volltrocknung (90% TR)
mit zusätzlichem Wärmebedarf



Kläranlage Göttingen – Ergebnisse modellgestützte Verfahrensauswahl





1. Trocknung über Eigenwärme

- bis 36% TR möglich, ↑ ca. 10%
- 1 LKW/d bzw. ca. 20 t OS/d
- Einsparung THG-Emissionen LKW-Transport ~ 25 Mg CO₂e/a

2. Volltrocknung

- Ziel ca. 90% TR, ↑ ca. 65%
- 0,4 LKW/d bzw. ca. 8 t OS/d
- Lagerkapazität: 12 Tage, (↑ 10 Tage)
- Einsparung THG-Emissionen LKW-Transport ~ 65 Mg CO₂e/a



Kläranlage Göttingen – Ergebnis modellgestützte Verfahrensauswahl





Verfahrensentscheidung Trocknung

Bewertungs-Ziele:

- Energiebilanz (externe Wärme?!)
- Investitionskosten (€/a)
- Entsorgungskosten (€/a nach OS)
- THG-Emissionen (CO₂e)
- Flexibilität/Betrieb in Kombination mit KNRN

Aktueller Stand:

- Volltrocknung
- Einsatz eines Bandtrockners
- Abfuhr per LKW
- Baubeginn 25/26

- Flexibilisierung Transport
 - Menge
 - Lagerung
 - Intervall Abholung

transport ohne Trocknung:

- + keine stzliche Energie erford ch
- Anbindung Bahngleis nicht möglich
- + keine zusatz Ruckbe ung
- CO Asparung Transport: ca. 75. Se/a
 - zusätzliche Investitionskosten

Teiltrocknung mit Eigenenergie:

- keine Energie erforderlich
- zusätzliche Investitionskosten
- zusätzliche Rückbelastung
- + CO₂-Einsparung Transport, aber CO₂ ↑ für Energie + Bau

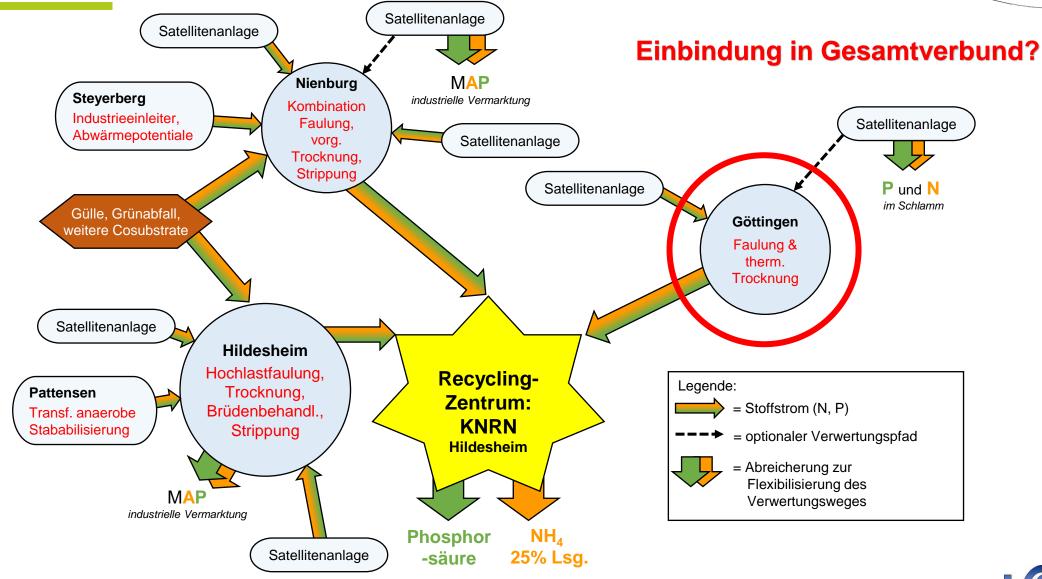
Volltrocknung:

- zusätzliche Energie erforderlich
- zusätzliche Investitionskosten
- zusätzliche Rückbelastung
- + CO₂-Einsparung Transport, aber CO₂ ↑ für Energie + Bau



Verfahrensbewertung und -auswahl: Einzelanlage







Ebenen der strategischen Investitionsplanung



a) Gesamt-Schlammmanagement KNRN

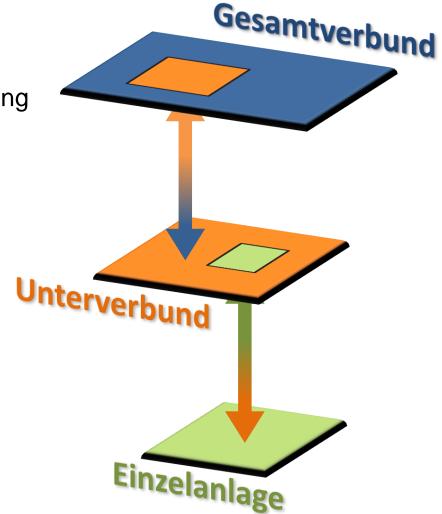
- Auswirkungen vorgelagerter Entscheidungen auf Schlammmengen, -struktur und Transport (Flexibilisierung/Stabilisierung durch übergeordnete Planung und dann Bewirtschaftung)
- Planung und Implementierung eines nachhaltigen Logistikkonzeptes

b) Unterverbund / Modellregion

- Semizentrale Schlammbehandlung
- Maschinenring, Logistik (Lagern/Transport)
- Einbeziehung von Wirtschaftsdüngern (Co-Substrat, regionale Nährstoff-Rückführung)

c) Anpassung Kläranlagenbetrieb

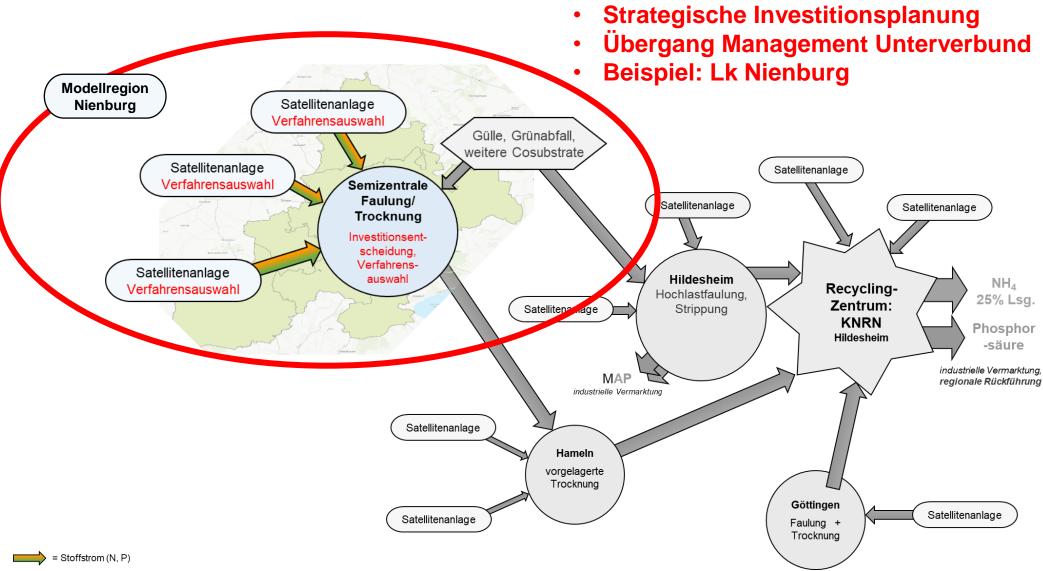
Verfahrensauswahl und Transformation der regionalen Kläranlagen





Regionale Betrachtung: Modellregion Nienburg







Modellregion – Informationen

- 2 regionale Zentren: Nienburg (Weser) & Rehburg
- 11 Satellitenanlagen

Stellv. Rolle in Projektverbund

- Viele kleine selbstverwaltete KAs < 20.000 EW</p>
- KA in ländlichen Regionen
 - Zielgebiet Projekt: landwirtschaftlich geprägte Bundesländer
- Bisher qualitätsbasierte bodenbezogene KS-Verwertung
- Keine Faulung oder Entwässerung

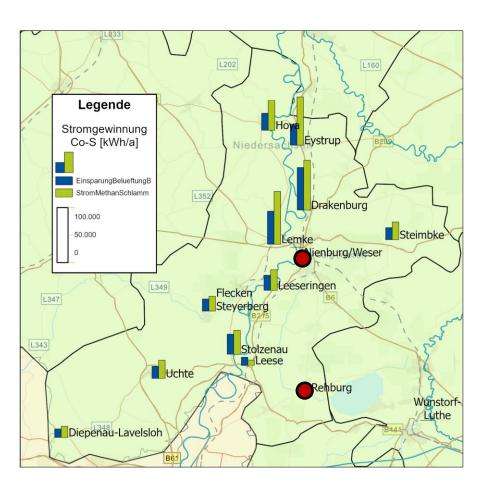




Satellite

Umstellung Stabilisierung – Energie





- Gemeinsame Entsorgung in MKV (KNRN GmbH)
- Umstellung der Satelliten auf anaerobe Stabilisierung
- Ersparnisse & Erträge: 900.000 kWh_{el}/a
- Zusätzl. Potential Co-S.: 6.350.000 kWh_{el}/a

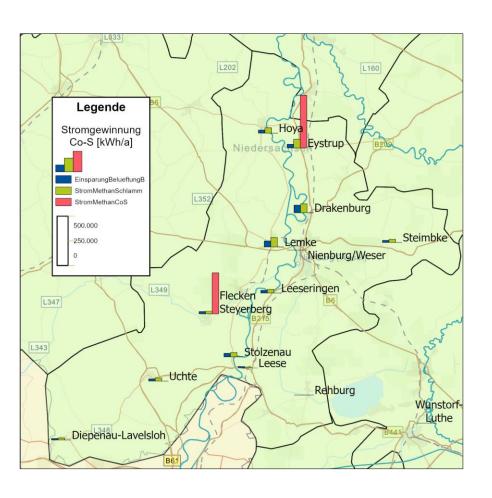
Anaerobe Klärschlammstabilisierung → Bau Faulung

Kosten, Aufwände



Umstellung Stabilisierung – Energie



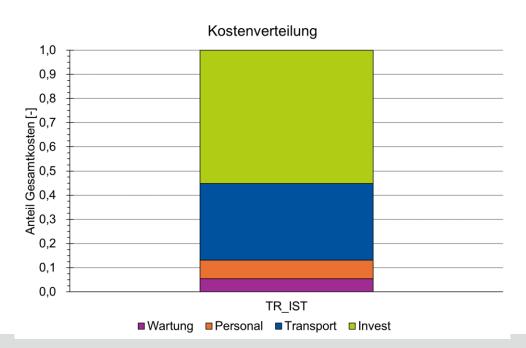


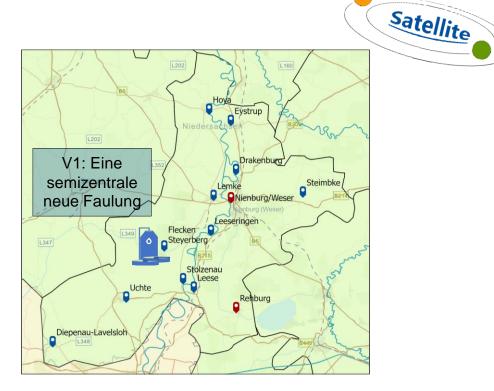
- Ersparnisse & Erträge: 900.000 kWh_{el}/a
- Zusätzl. Potential Co-S.: 6.350.000 kWh_{el}/a
- Potential Co-S Bsp. Eystrup: 535.000 kWh_{el}/a
- Bsp. Flecken Steyerberg: 415.000 kWh_{el}/a



Semizentrale Faulung – Bewertung

FB-Volumen (€) Transport (€, CO₂e) Personal (€, Akzeptanz)

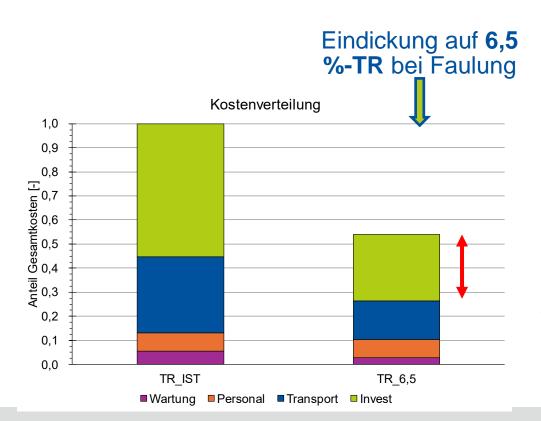






Semizentrale Faulung – Bewertung

FB-Volumen (€) Transport (€, CO₂e) Personal (€, Akzeptanz)





Reduzierung Bau- & Transportkosten

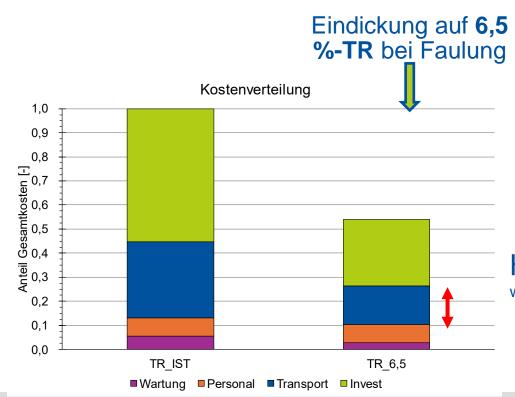
■ Eindickung $TR_{IST,\emptyset} \approx 3.1 \% \rightarrow TR_{Soll,\emptyset} \approx 6.5 \%$

Weitere Volumenreduzierung durch Thermophile Hochlastfaulung
→ ca. 12d statt 20 d Aufenthaltszeit



Semizentrale Faulung – Bewertung

FB-Volumen (€) Transport (€, CO₂e) Personal (€, Akzeptanz)





Reduzierung Bau- & Transportkosten

■ Eindickung $TR_{IST,\emptyset} \approx 3.1 \% \rightarrow TR_{Soll,\emptyset} \approx 6.5 \%$

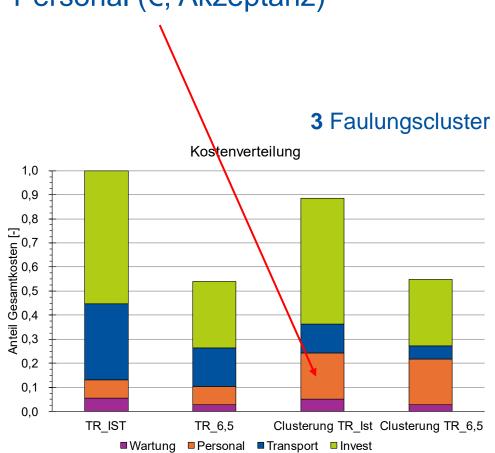
Halbierung <u>Transportkosten</u> möglich, wenn Eindickung auf Einzelanlagen

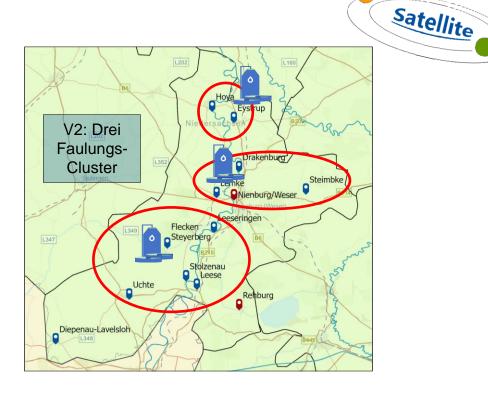
• CO_2 e-Einsparung = 66 Mg/a



Umstellung Stabilisierung – Kosten

FB-Volumen (€) Transport (€, CO₂e) Personal (€, Akzeptanz)





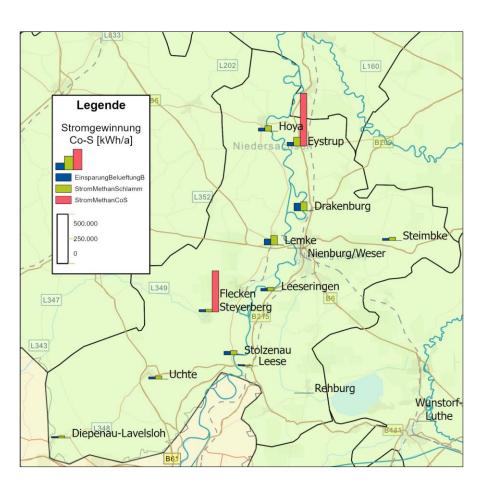
Reduzierung <u>Transportkosten</u>

- Clusterung Stoffströme
 - → Bau mehrerer Faulungen im Gebiet
- Verringerung der Transportkosten um 62%
 - ightharpoonup CO₂e_{Transport}-Einsparung = 111,5 Mg/a
- Optimale Auslegung für lokale Co-Substrate



Umstellung Stabilisierung – CO₂e





- Ersparnisse & Erträge: 900.000 kWh_{el}/a
- Zusätzl. Potential Co-S.: 6.350.000 kWh_{el}/a
- Potential Co-S Bsp. Eystrup: 535.000 kWh_{el}/a
- Bsp. Flecken Steyerberg: 415.000 kWh_{el}/a

<u>Verringerung CO₂e-Emissionen</u>:

Belüftungsenergie
 125,9 Mg CO₂e/a

Verstromung Methan
 182,7 Mg CO₂e/a

Verstromung Methan Co-S. 2.184,2 Mg CO₂e/a

Strommix 100% erneuerbar

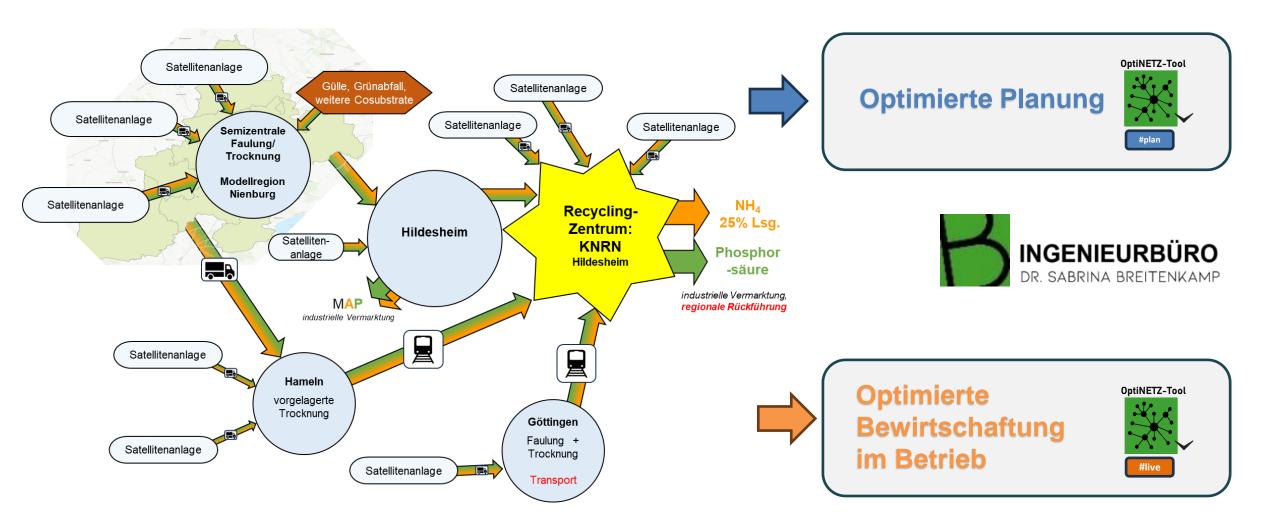
- → Stromeinsparung nicht mehr sichtbar in Bilanz
- → Gutschriften nach IPCC-Protokoll nicht erlaubt

<u>Transport:</u> kann zu einer **Erhöhung** führen oder, bei weitgehender Volumenreduzierung durch solare Trocknung am Flecken Steyerberg zu einer **massiven Reduzierung**



Optimierte Planung und Bewirtschaftung im Gesamtverbund







Was kann das Modell Gesamtverbund?

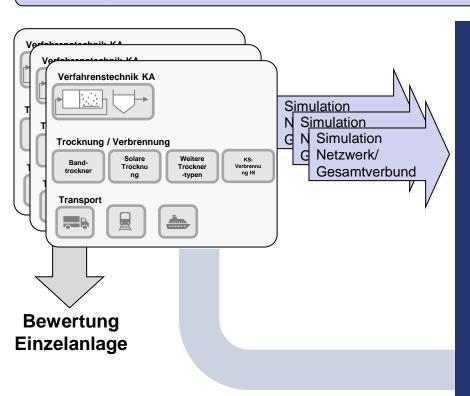


1) Bilanzierungs-Modell für den Gesamtverbund

- ⇒ Darstellung IST-Zustand
- ⇒ Szenarienberechnung
- ⇒ Prognosemodelle

2) Bewertung

- Konzeptauswahl
- ⇒ strategische Investitionsplanung



Stoffströme

Schlammmengen und -qualiäten (OS, TM, oTM, P, N, Fe, AI)

Aschemengen und -qualitäten

Reststoffe Verbrennung

Rückgewinnungspotentiale P

Rückgewinnungspotentiale N

Energiebedarf

Strom

Wärme

Kosten

Heizwert Schlamm

Transport

Transportmittel

Transportwege

CO2-Äquivalente

Kosten

Strategische Ziele Gesamtverbund:

Bewertung Gesamtverbund Minimierung Entsorgungskosten Schlamm Maximierung Nährstoffrückgewinnung Minimierung Transportkosten Einhaltung Fahrtenbegrenzung HI Minimierung CO2-Footprint Transport

Szenarienauswahl Gesamtverbund



Werkzeugkasten OptiNETZ-Tool: Optimierte Planung und Bewirtschaftung im Verbund

OptiNETZ-Tool



Optimierte Planung

- Investitionsentscheidungen:
 - → Monoverbrennung
 (ja/nein, Standort, Mengen, Energiekonzept)
 - → Vorgelagerte Trocknungsstandorte (ja/nein, Standorte, Mengen, Energiekonzept)
 - → P-Rückgewinnungsverfahren
 - $\rightarrow \dots$
- Transport- und Logistikkonzept
- Entwässerungs- und Trocknungskonzept
- Recylingpotentiale Nährstoffe

Optimierter Betrieb

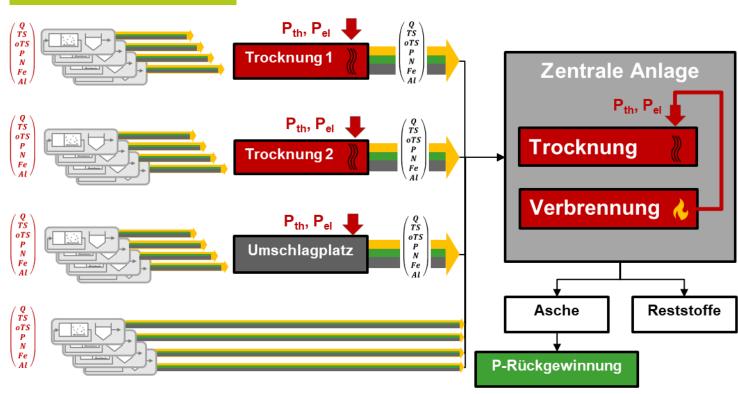
- Inputsteuerung Verbrennung:
 - → Optimierung Energiebilanz (z.B. TR, Heizwert Input)
 - → Optimierung Nährstoffrückgewinnung (z.B. Nährstoffgehalt)
- Betriebs-/Bewirtschaftungsstrategien (z.B. jahreszeitlich flexibilisierte Entsorgungswege, Wartung)
- Steuerung Logistik (Mengen, Abholintervalle, Speicherbewirtschaftung)
- Regionale Nährstoffrückführung

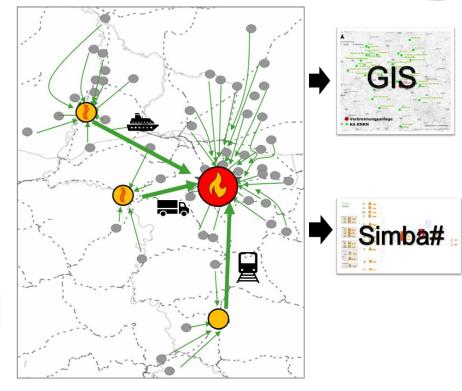




Beispiel OptiNETZ-Tool #plan







Schlamm

- ✓ Anfall (Mengen)
- ✓ Wassergehalt
- ✓ Qualität
- ✓ Stabilisierungsgrad
- √ Heizwert

Trocknung

- + Verbrennung
- ✓ Energiebedarf
- √ Kosten
- √ CO₂-Äquivalente (Betrieb)

Transport



- √ Kosten
- √ CO₂-Äquivalente

Rückgewinnung

- ✓ Potentiale Rückgewinnung P, N
- ✓ Reststoffe Rückgewinnung
- √ Kosten
- √ CO₂-Äquivalente

OptiNETZ-Tool



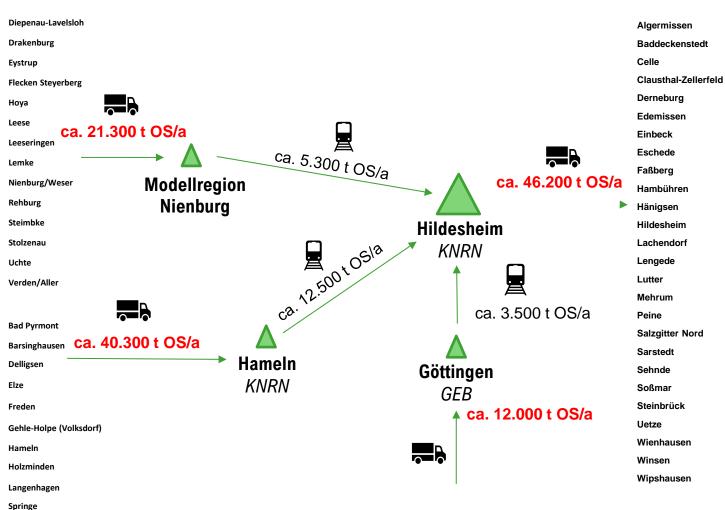




Beispiel Szenarienbetrachtung KNRN



Gesellschafter + Mengen Stand 06/22 (Beispiel, nicht aktueller Stand der Umsetzung!)



Annahmen:

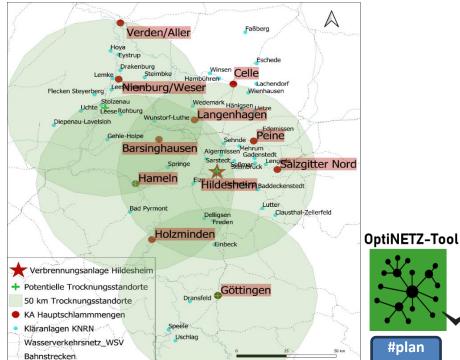
1-3 Trocknungsstandorte:

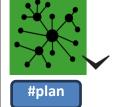
Hameln: Volltrocknung auf 85%TR min. Volltrocknung auf 85% TR min. Göttingen:

Nienburg: Volltrocknung auf 85% TR min.

min. Entwässerungsgrad aller Anlagen:

Entwässerung neu 22%, sonst status quo



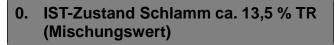




Wedemark/Bissendorf Wunstorf- Luthe

Beispiel Szenarienbetrachtung KNRN

Zielsetzung Optimierung Energiebilanz Hildesheim





1. Anpassung Entwässerung aller Einzelanlagen auf min. 24% TR



- 2. Vorgelagerte Trocknung Hameln
- a) Clusterung 1
- b) Clusterung 2

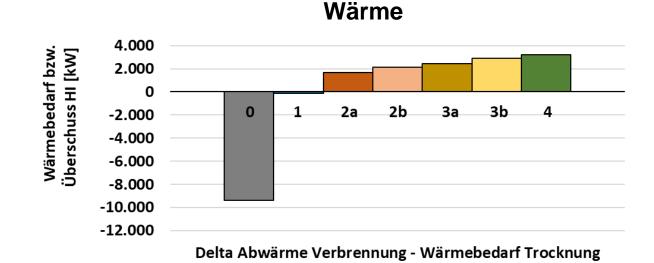


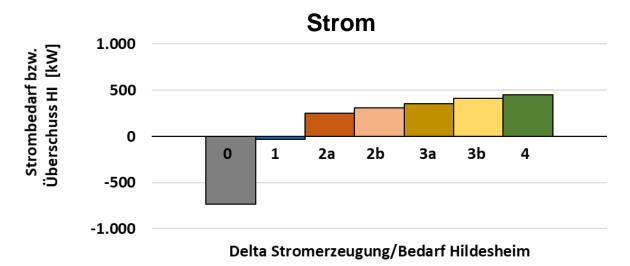
- 3. Vorgelagerte Trocknung HM + GÖ
- a) Clusterung 1
- b) Clusterung 2

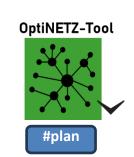


4. Vorgelagerte Trocknung HM, GÖ, NI

→ Clusterung 3







Satellite

Beispiel Szenarienbetrachtung KNRN

Satellite

Zielsetzung Minimierung CO₂-Äquivalente Transport

0. IST-Zustand Schlamm ca. 13,5 % TR (Mischungswert)



1. Anpassung Entwässerung aller Einzelanlagen auf min. 24% TR



- 2. Vorgelagerte Trocknung Hameln
 - a) Clusterung 1
 - b) Clusterung 2

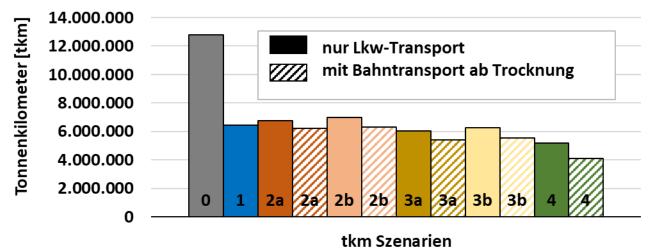


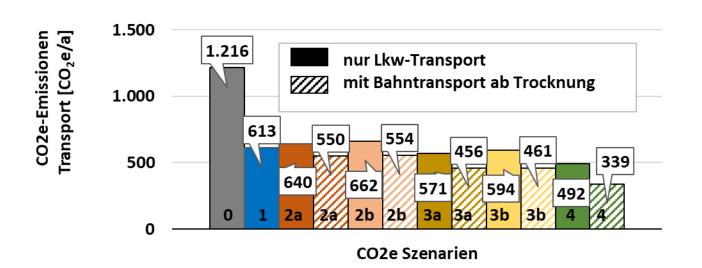
- 3. Vorgelagerte Trocknung HM + GÖ
 - a) Clusterung 1
 - b) Clusterung 2



4. Vorgelagerte Trocknung HM, GÖ, NI

→ Clusterung 3

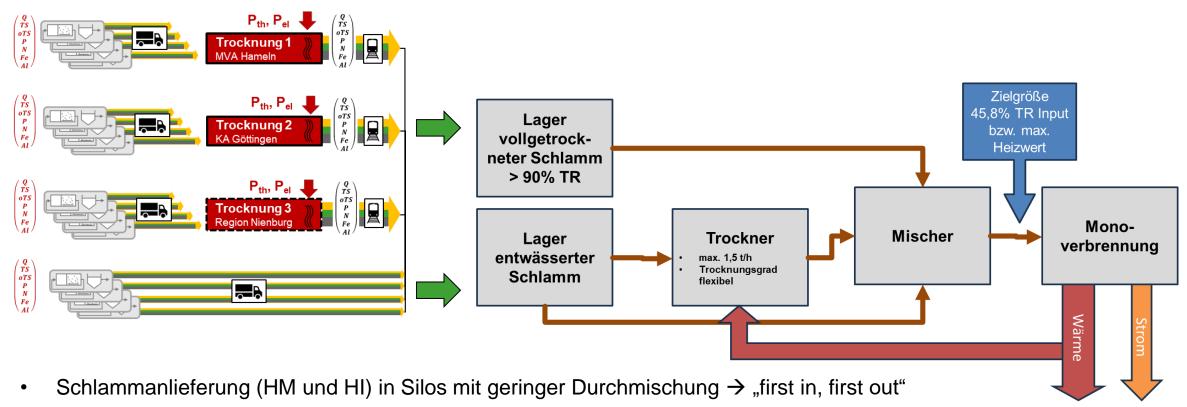






OptiNETZ-Tool #live - Prototyp Beispiel KNRN





- Inputsteuerung Verbrennung über gesteuerte Befüllung der Silos (Schlammmengen und -qualitäten!)
 + Zumischung getrockneter Schlamm
- Konzept: Ableitung eines Monatsabholplans bzw. Befüllplans für den Klärschlamm (Idealzustand); bei Änderungen (erforderliche Zusatzabholung, Wartung usw.) iterative Anpassung für Inputoptimierung
- Steuerung: maximale Auslastung Hameln + Restmenge nach Hildesheim

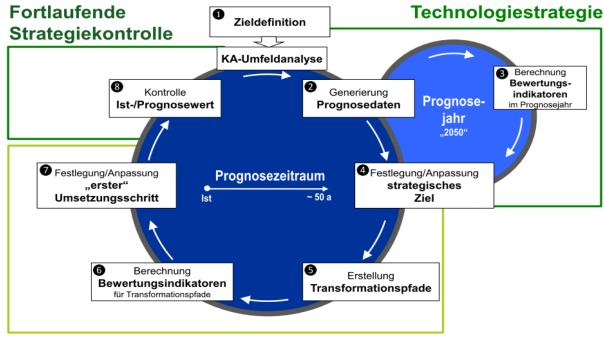


Modellgestützte Strategieentwicklung und Betrieb



Modellbildung

Bilanzierung



Investitionsstrategie

Aus BMBF-Projekt E-KLÄR; Laufzeit: 05/2014 - 04/2017 Förderkennzeichen: 02WER1319, Beier/Manig 2016 Betreiber-Workshop



Modellgestützte Strategieentwicklung und Betrieb



Modellbildung

Bilanzierung

Bilanzierungs-Modell (modular aufgebaut)

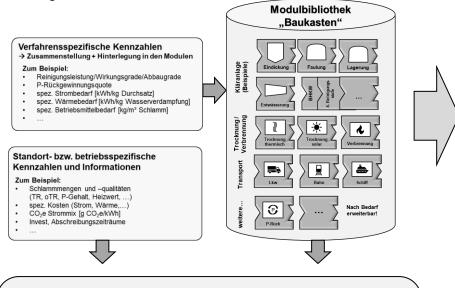
⇒ Darstellung IST-Zustand

Prozesskettenbeispiel

Faulung

Eindickung

- ⇒ Szenarienberechnung
- ⇒ Prognosemodelle



Entwässerung

Stoffströme

Schlammmengen und -qualitäten (OS, TM, oTM, P, N, Fe, Al) Aschemengen und -qualitäten Reststoffe Verbrennung Rückgewinnungspotentiale P und N

Energiebedarf

Strom Wärme Heizwert Schlamm

Transport

Transportwege (km, tkm)

Kosten

Invest Prozesskette Betrieb Prozesskette Entsorgungskosten (€/t OS)

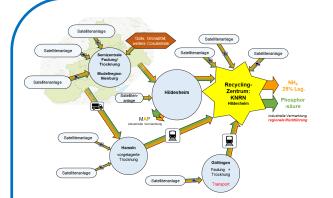
CO₂e

CO₂e Einzelmodule
Direkte Emissionen CO₂e Prozesskette
Indirekte Emissionen CO₂e Prozesskette
Gesamtbilanz CO₂e Prozesskette



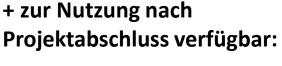
Modellgestützte Strategieentwicklung und Betrieb





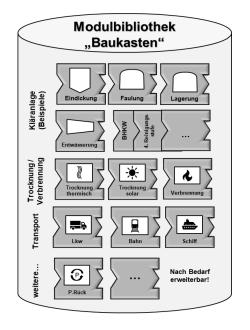
Modellgestützte Bewertung und Verfahrens- bzw. Konzeptauswahl für verschiedene Perspektiven

- Strategische Aufstellung der Einzelanlage im Verbund
 - → Modelle für Einzelanlagen
- Analyse, Bewertung und Auswahl regionaler Konzepte
 - → Modellregion Nienburg
- Optimierte Planung und Betrieb im Gesamtverbund
 - → Werkzeugkasten OptiNETZ-Tool



- → Modulsteckbriefe
- → Modulbibliothek

Gesamtverbund





Modulbibliothek

Verfahrensspezifische Kennzahlen

→ Zusammenstellung + Hinterlegung in den Modulen

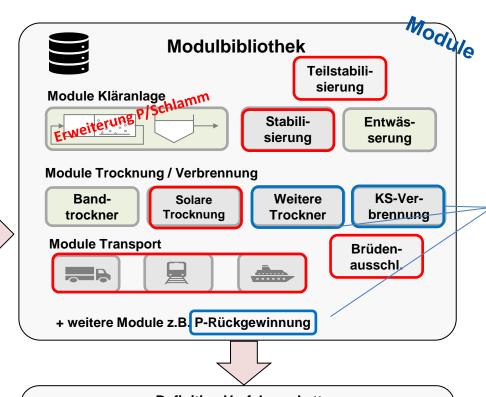
Zum Beispiel:

- Reinigungsleistung/Wirkungsgrade/ Abbaugrade
- P-Rückgewinnungsquote
- spez. Strombedarf [kWh/kg Durchsatz]
- spez. Wärmebedarf [kWh/kg Wasserverdampfung]
- · spez. Betriebsmittelbedarf [kg/m³ Schlamm]

Standort- bzw. betriebsspezifische Kennzahlen und Informationen

Zum Beispiel:

- P-Eliminationsverfahren
- Entwässerungsgrad
- Schlammmengen und -qualitäten (TR, oTR, P-Gehalt, Heizwert, ...)
- spez. Kosten (Strom, Wärme,...)
- CO₂e Strommix [g CO₂e/kWh]
- Invest, Abschreibungszeiträume
- Vorhandene Anlagentechnik
- Entfernungen, Verkehrsanschluss



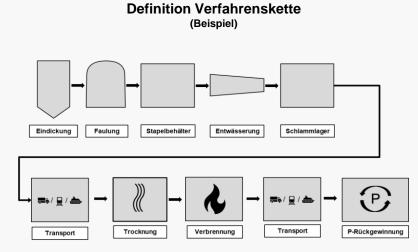


Steckbriefe & Statusbericht

Satellite

Verfahren	Projekt	Ausgangsstoff	Produkt
Parforce	Amphore	KSA	P-Säure
Pontes Pabuli	DreiSats	KSA	Düngemittel
DreiSats Staubfeuerung		KS (entw./trock.)	Asche/Dünge-mittel
AshDec	R-Rhenania	KSA	AshDec Düngemittel
R-Rhenania		KS (entw./trock.)	R-Rhenania Düngemittel
Phos4Green	RePhoRM	KSA	Düngemittel
PECO	P-Net	KA (ÜSS & PS)	Struvit
KlimaPhoNds	KlimaPhoNds	KA (ÜSS & PS)	Struvit

Modellunterstütze Szenarienanalyse





RePhoR-Verfahrenssteckbriefe



Verfahren	Projekt	Ausgangsstoff	Produkt
Parforce	Amphore	KSA	P-Säure
Pontes Pabuli	DreiSats	KSA	Düngemittel
DreiSats Staubfeuerung		KS (entw./trock.)	Asche/Dünge-mittel
AshDec	R-Rhenania	KSA	AshDec Düngemittel
R-Rhenania		KS (entw./trock.)	R-Rhenania Düngemittel
Phos4Green	RePhoRM	KSA	Düngemittel
PECO	P-Net	KA (ÜSS & PS)	Struvit
KlimaPhoNds	KlimaPhoNds	KA (ÜSS & PS)	Struvit

