

Mit der Pinch-Technologie Prozesse und Anlagen optimieren



(Umschlagseite 2)

Mit der Pinch-Technologie Prozesse und Anlagen optimieren

Eine Methode des betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements

herausgegeben von der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg
1. Auflage, Karlsruhe 2003

Impressum

Titel	Mit der Pinch-Technologie Prozesse und Anlagen optimieren
ISSN	(Bd. X, 2003)
Herausgeber	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Postfach 21 07 52 D-76185 Karlsruhe www.lfu.baden-wuerttemberg.de
Projektleitung LfU	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) Abteilung 3 – Industrie und Gewerbe Dr. Gabriel Striegel
Projektbearbeitung	Linnhoff March Limited, Cheshire CW9 7 UZ, United Kingdom www.linnhoffmarch.com
Förderung	Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
Überarbeitung	Dipl. Phys. Michael Lörcher, Akku Umweltberatung GmbH, D-80469 München, www.aku-gmbh.de
Redaktion und Gestaltung	akzente Kommunikationsberatung, D-80469 München www.akzente.de
Umschlaglayout	Stephan May Grafik Design, D-76227 Karlsruhe
Titelbild	Jutta Ruloff, Diplom-Designerin, D-76275 Ettlingen
Druck	(Engelhardt&Bauer Druck und Verlagsgesellschaft mbH, Karlsruhe) Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100% Altpapier
Bezug über	Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg Referat 15 – Bibliothek Postfach 21 07 52 D-76157 Karlsruhe Fax: +49 (0) 7 21 9 83-14 56
Preis	X €

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

Inhalt

1	Zusammenfassung	06
1.1	Pinch-Technologie – was ist das?	06
1.2	Wann ist die Pinch-Technologie anwendbar?	06
1.3	Welche Ergebnisse lassen sich von der Pinch-Technologie erwarten?	07
2	Hintergrund	08
2.1	Worauf beruht die Pinch-Technologie	08
2.2	Welchen Nutzen hat die Pinch-Technologie	09
3	Hinweise zum Leitfaden	10
4	Eine Einführung in ein ESSM mit der Pinch-Technologie	11
4.1	Ausgangslage	11
4.1.1	Erweiterung des klassischen ESSM	11
4.1.2	Prozessintegration	11
4.2	Zielsetzungen für den Einsatz der Pinch-Technologie	11
4.3	Nutzen durch die Anwendung der Pinch-Technologie	12
4.4	Anwendungsgebiete für die Pinch-Technologie	13
4.4.1	Der Einsatz in Wärmesystemen	13
4.4.2	Der Einsatz in Stoffsystemen	14
4.5	Spezielle Anwendungen	14
4.5.1	Bau neuer Anlagen	15
4.5.2	Steigern des Durchsatzes – Erfüllung neuer Produktspezifikationen	15
4.5.3	Steigern der Leistung des Versorgungssystems am Standort	16
4.5.4	Planen und Senken der Investitionsausgaben	16
4.6	Die grundlegende Idee des Pinch-Konzepts	16
4.7	Elemente des Pinch-Konzepts	18
4.7.1	Der Wärme-Pinch	18
4.7.2	Die Pinch-Zerlegung	19
4.7.3	Der Wasser-Pinch	20
5	Vorgehensweise	21
5.1	Festlegung von Optimierungszielen vor dem Prozessdesign	21
5.2	Vorgehensweise in Phasen	21
5.2.1	Die Analyse	22
5.2.2	Die Synthese	24
5.3	Der Entscheidungsplan	24

6	Praxisbeispiele	26
6.1	Umweltpolitische Schwerpunkte der LfU	26
6.2	Firma Dr. Willmar Schwabe, Karlsruhe	27
6.2.1	Das Unternehmen	27
6.2.2	Die Ausgangssituation	27
6.2.3	Strukturierte Problemlösung	29
6.2.4	Modellierung	29
6.2.5	Zielfestlegung	31
6.2.6	Ergebnisse	33
6.2.7	Fazit	33
6.3	SMURFIT Munsjö Paper GmbH & Co. KG, Unterkochen	34
6.3.1	Das Unternehmen n	34
6.3.2	Die Ausgangssituation	34
6.3.3	Strukturierte Problemlösung	34
6.2.4	Modellierung	36
6.3.5	Zielfestlegung	37
6.3.6	Ergebnisse	39
6.3.7	Fazit	39
6.4	Fürstlich Fürstenbergische Brauerei KG, Donaueschingen	40
6.4.1	Das Unternehmen	40
6.4.2	Die Ausgangssituation	40
6.4.3	Strukturierte Problemlösung	41
6.4.4	Modellierung	41
6.4.5	Zielfestlegung	42
6.4.6	Ergebnisse	44
6.4.7	Fazit	45
6.5	Böhringer Ingelheim Pharma KG, Biberach	46
6.5.1	Das Unternehmen	46
6.5.2	Die Ausgangssituation	46
6.5.3	Modellierung	47
6.5.4	Zielfestlegung	48
6.5.5	Fazit	48
6.6	Hinweise zum Vorgehen und Erfolgsfaktoren für Pinch-Projekte	49

A	Anhang A: Grundlagen der Pinch-Technologie	50
A 1	Allgemeine Hinweise	50
A 2	Methodik des Wärme-/Energie-Pinch	50
A 2.1	Das Konzept der Composite-Kurven	50
A 2.2	Ermittlung des Energieoptimums	52
A 2.3	Das Pinch-Prinzip	53
A 2.4	Zielfestlegung für mehrere Hilfsstoffe: die Grand Composite-Kurve	53
A 2.5	Allgemeine Prinzipien für Prozessmodifikationen	54
A 2.6	Das „Plus-Minus“-Prinzip für Prozessmodifikationen	55
A 2.7	Die Betrachtung ganzer Standorte: Die Total-Site-Analyse	55
A 3	Methodik des Wasser-Pinch	56
A 3.1	Ausgangssituation	56
A 3.2	Parallelen zum Wärme-Pinch	57
A 3.3	Kombination mehrerer Schadstoffe	57
A 3.4	Sensitivitätsanalyse	58
A 3.5	Lösungsansätze	58
A 3.6	Eine typische Wasser-Pinch-Studie	60
B	Anhang B	62
B 1	Literatur und Software	62
B 1.1	Literatur	62
B 1.2	Verwendete Software-Tools	62
B 2	Abkürzungsverzeichnis	63
B 3	Glossar	63
B 4	Weitere Informationen	65
B 4.1	Institutionen und Behörden	65
B 4.2	Universitäten	65
B 4.3	Beratungsunternehmen	65

1 Zusammenfassung

1.1 Pinch-Technologie – Was ist das?

Die Pinch-Technologie ist eine Methode, die es ermöglicht, den Einsatz von Hilfsstoffen wie Energie und Wasser in verfahrenstechnischen Prozessen und Anlagen zu analysieren und zu optimieren. Mit ihr lässt sich bestimmen:

- wie viel Energie, Wasser oder sonstige Hilfsstoffe der Produktionsprozess tatsächlich benötigen würde, wenn die Anlagen optimiert wären,
- wie dieser Optimalzustand erreicht werden kann,
- wo und wie Kosten für Energie, Hilfsstoffe und Investitionen optimiert werden können.

Die Pinch-Technologie zeichnet sich durch einen systematischen Ansatz aus, mit dem sich der optimale Energieeinsatz und das beste Anlagen-

design bestimmen lassen. Dabei werden verschiedene Zielsetzungen wie Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und Investitionskosten betrachtet und bewertet. Daraus wiederum wird die optimale Umsetzungsstrategie abgeleitet. Im Vergleich zum reinen Energie- und Stoffstrommanagement berücksichtigt die Pinch-Technologie hierbei thermodynamische bzw. chemische Gesetzmäßigkeiten, die bei der Wiederverwendung von Wärme bzw. Wasser oder Gasen zu beachten sind.

Die Bezeichnung Pinch-Technologie leitet sich aus der Darstellung ihrer Ergebnisse ab. Stellt man nämlich die Wärme- und Kälteströme einer Anlage grafisch dar, so entsteht typischerweise an der Stelle der größten Annäherung der Kurven eine Art Einschnürung (engl. Pinch), die für die weitere Analyse und Optimierung eine zentrale Bedeutung hat (s. Abb. 1.1).

1.2 Wann ist die Pinch-Technologie anwendbar?

Die Pinch-Technologie ist anwendbar:

- auf industriellen Anlagen mit Heiz- und Kühlprozessen,
- auf Anlagen mit Wassereinsatz/Abwasser und Verwendung von Gasen (wie Wasserstoff),
- auf Anlagen im kontinuierlichen Betrieb,
- auf Batch-Anlagen,
- auf einzelne Anlagen
- auf gesamte Produktionsstandorte,
- bei der Anlagenkonzeption und Projektierung,
- bei der Sanierung und dem Umbau bestehender Anlagen (Retrofit-Projekte).

Weiterhin lässt sie sich anwenden

- bei Bestandsaufnahmen der betrieblichen Energiewirtschaft im Rahmen von Umweltmanagementsystemen,
- zur Unterstützung der technischen Maßnahmenplanung.

Anmerkung:

Pinch-Technologie im engeren Sinne bezeichnet ein thermodynamische Analyse- und Auswertungsverfahren (s. Anhang A „Grundlagen der Pinch-Technologie“). Im Rahmen dieses Leitfadens wird unter Pinch-Technologie im weiteren Sinne eine Methode des Energie- und Stoffstrommanagements (ESSM) verstanden, bei der dieses thermodynamische Analyseverfahren eingesetzt wird.

1.3 Welche Ergebnisse lassen sich von der Pinch-Technologie erwarten?

- Berechnung des Optimierungsgrads der bestehenden Anlage, das heißt Berechnung des Einsparpotenzials an Wärme, Strom und Wasser (Prozessenergie).
- Bei Neu- und Umbauprojekten Maximierung des Nutzungsgrads, da die Anlage schon von Beginn an im energetisch optimalen Zustand läuft
- Erhöhung der Energie- und Rohstoffeffizienz
- Optimierung der Investitions- und Betriebskosten
- Einsparung von potenziell 15 bis 40 Prozent der Prozessenergie bei Amortisationszeiten von durchschnittlich ein bis vier Jahren für die Investitionen – je nach Branche
- Maßgeschneiderte Dimensionierung der zugehörigen Infrastrukturanlagen für Wärme, Dampf, Wasser und Kälte

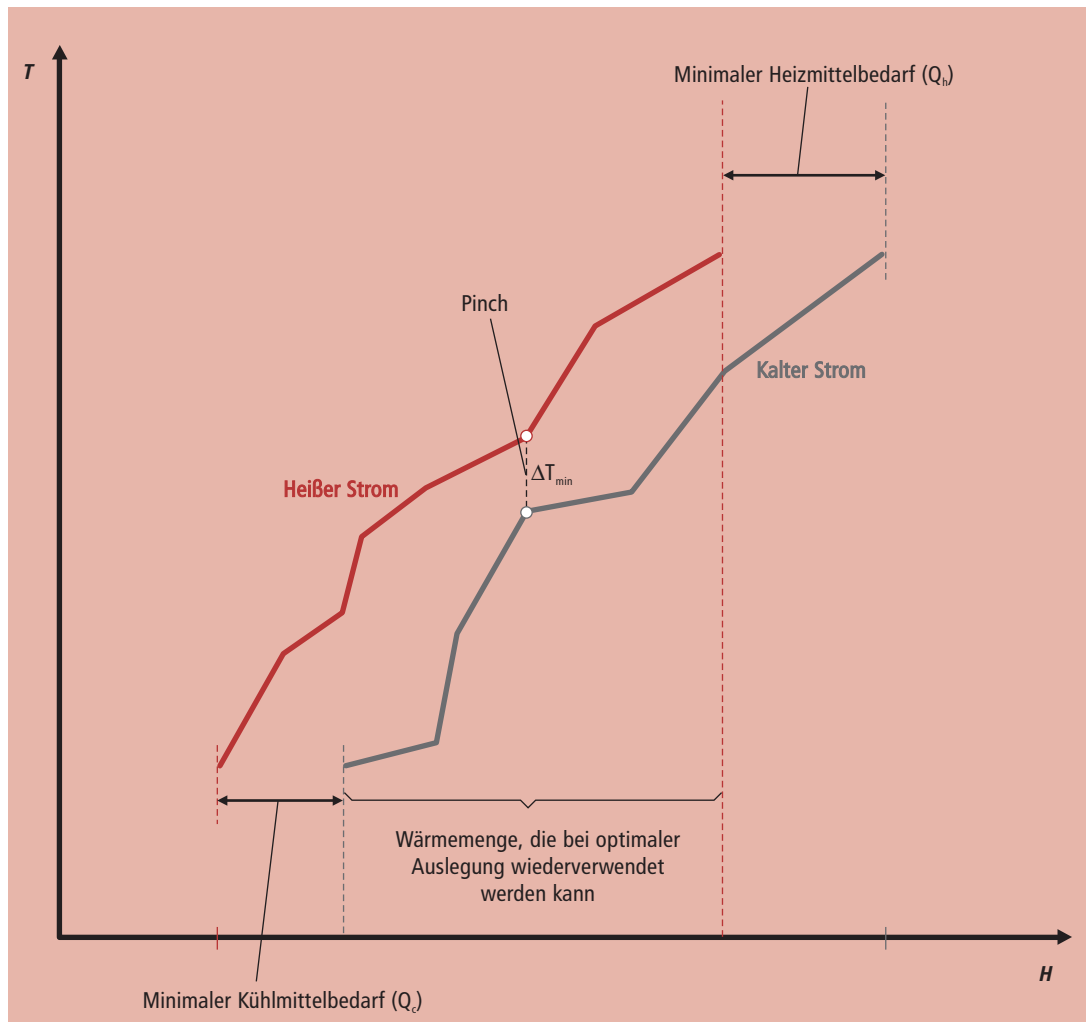


Abb. 1.1: Schematische Darstellung eines Pinches

2 Hintergrund

Unternehmen, die verfahrenstechnische Prozesse und Anlagen betreiben – im Folgenden auch als Anlagenbetreiber bezeichnet –, unterliegen heutzutage vielfältigen internen und externen Anforderungen.

Die angewandten Verfahren und Prozesse sollen nicht nur das gewünschte Reaktionsergebnis oder Produkt erzeugen, sondern gleichzeitig auch einen möglichst hohen Durchsatz erreichen, eine maximale Verfügbarkeit gewährleisten, im Energie- und Rohstoffverbrauch so effizient wie möglich sein und darüber hinaus so wenig umweltbelastende Emissionen wie möglich erzeugen.

Energie- und Stoffstrommanagement (ESSM):

Energie- und Stoffstrommanagement ist eine ganzheitliche und systematische Betrachtung der betrieblichen Energie- und Stoffströmen.

Die Energie- und Stoffströme und die damit verbundenen Kosten werden erfasst und damit transparent. Die Prozessabläufe werden in einem Modell abgebildet und können dann systematisch analysiert und optimiert werden.

Um dies zu erreichen, muss darüber nachgedacht werden, was neben einem guten Instandhaltungsmanagement und der Erhöhung der Wirkungsgrade der Einzelanlagen dazu beitragen kann. In den letzten zehn Jahren wurden mehrere Konzepte entwickelt, durch die sich zusätzliche Optimierungspotenziale aufdecken lassen.

Vielen Praktikern wird das Energie- und Stoffstrommanagement bereits ein Begriff sein. Es zielt darauf ab, die betrieblichen Abläufe gesamtheitlich zu optimieren, indem es die ein- und ausgehenden Energie- und Stoffströme systematisch erfasst und analysiert. In der praktischen Umsetzung stützt sich das Energie- und Stoffstrommanagement vor allem auf die Möglichkeit, Kreisläufe zu schließen und die Wiederverwendung auszubauen. Von Interesse sind dabei – vor allem bei steigenden Energiepreisen – auch Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung, also zur Mehrfachnutzung von Wärme. Allerdings sind diese meist mit größeren Investitionen verbun-

den, beispielsweise für Wärmetauscher oder Verrohrungen. Deshalb sollte eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit immer Bestandteil einer solchen Analyse sein.

Der Begriff „Stoff“ wird hierbei sehr weit gefasst und kann chemische Elemente, Verbindungen, technische Bauteile oder sogar Produkte bezeichnen. Ziel einer Stoffstromanalyse ist meist, die Umweltbelastungen durch Optimierung der Stoffströme unter Berücksichtigung ökonomischer und sozialer Aspekte zu verringern.

Die Pinch-Technologie reiht sich in die Methoden des ESSM ein und berücksichtigt darüber hinaus gewisse thermodynamische Prinzipien der betrachteten Prozesse. Eine Energie- und Stoffstromanalyse erfolgt normalerweise auf der Basis von Mengen – also quantitativ. Bei chemisch-physikalischen Prozessen hingegen gibt es zusätzlich eine Reihe von „qualitativen“ Kriterien. So ist der Betrieb verfahrenstechnischer Anlagen wie Reaktoren, Trennanlagen, Heizkessel, Wärmetauscher, Verdampfer oder Kälteanlagen beispielsweise abhängig vom Temperaturniveau der Wärmeenergieträger (z.B. des Dampfes) oder vom Reinheitsgrad der Stoffströme (z.B. des Brauchwassers). Dadurch werden klare physikalisch-chemische Grenzen für eine mögliche Wiederverwendung gesetzt.

Da für den Ablauf von verfahrenstechnischen Prozessen neben der Wärmemenge meist auch ein bestimmtes Temperaturniveau erforderlich ist, kann Abwärme aus anderen Quellen nur dann genutzt werden, wenn sie diese Temperatur überschreitet. Analog können Wasserströme nur so lange im Kreislauf gefahren werden, wie sie die geforderten Reinheitsgrade nicht unterschreiten. Um unter diesen Rahmenbedingungen eine Optimierung der verfahrenstechnischen Prozesse zu ermöglichen, wurde die Pinch-Technologie entwickelt. Sie erweist sich heute als ein zentrales Verfahren für die Prozessintegration und das Prozessdesign.

2.1 Worauf beruht die Pinch-Technologie?

Die Pinch-Technologie beruht auf Prinzipien der Thermodynamik und erfordert daher gewisse Grundlagenkenntnisse. Bei komplexeren Anlagen

ist es nicht zu vermeiden, dass eine geeignete Software benötigt wird. Als Ausgleich für die Mühen gewinnt der Anwender zum Teil über-

raschende Einsichten in und ein klares Verständnis für die Gesamtzusammenhänge in den Prozessen, Anlagen oder sogar in seinem Gesamtstandort.

ESSM mit Pinch-Technologie betrachtet von vornherein auch Kostenaspekte und unterstützt so die Entscheidung bezüglich längerfristiger Investitionen. Da mithilfe der Pinch-Technologie klare Aussagen über die Anlagenoptima möglich sind, lassen sich Vorgehensweisen erarbeiten, die die vom Unternehmen gesetzten Ziele wie

Kostenoptimierung, Emissionsminderung und Ressourcenschonung mit einbeziehen.

Ein großer Vorzug der Pinch-Technologie ist, dass sie selbst bei einer Vielzahl von Alternativen einen Überblick über die Gesamtsituation vermittelt und damit erlaubt, die optimale Vorgehensweise (Roadmap) auszuwählen. Dies ist insbesondere dann hilfreich, wenn sich Rahmenbedingungen wie etwa die Energie- oder Abwassergrenzwerte ändern und eine Analyse der Gesamtauswirkungen gefordert ist.

2.2 Welchen Nutzen hat die Pinch-Technologie?

Entscheider wie Geschäftsführer oder Betriebsleiter profitieren von der Pinch-Technologie durch:

- die Möglichkeit zur ganzheitlichen Kostenbetrachtung des Prozessdesigns,
- die umfassende Analyse und ganzheitliche Betrachtung,
- die Unterstützung bei Entscheidungen über weitreichende Investitionen.

Umsetzer, Anwender wie Verfahrenstechniker, Verantwortliche für Energie- oder Hilfsenergie-(Utility)-Versorgung und Umweltbeauftragte profitieren von der Pinch-Technologie durch:

- die fortschrittliche Methodik zur Analyse und Bewertung der Prozesse oder Anlagen,
- die zielorientierte Optimierung der Prozesse und der Anlagensituation,
- die optimierte Planung von Neuanlagen bzw. Nachrüstung von Anlagen (Retrofit-Design).

Checkliste: Ist die Pinch-Technologie für unser Unternehmen interessant?

Wenn die folgenden Fragen für Ihr Unternehmen von grundlegendem Interesse sind, dann sollten Sie diesen Leitfaden lesen:

- Sind unsere vorhandenen Prozesse so energieeffizient wie möglich?
- Wie können neue Projekte im Hinblick auf ihre Energieanforderungen systematisch analysiert werden?
- Welche kostenneutralen Änderungen können durchgeführt werden, um die Energieeffizienz zu erhöhen?
- Welche Investitionen sind möglich, um die Energieeffizienz zu erhöhen?
- Welches ist der bestgeeignete Utility-Mix für unsere Prozesse?
- Wie können die verschiedenen Ziele wie Energieeffizienz, Kostenreduktion, Emissionsminderung, Kapazitätserhöhung in einen stimmigen, strategischen Plan für den gesamten Standort integriert werden?
- Ändern sich die Rahmenbedingungen (Rohstoff-, Energiekosten, Grenz- und Genehmigungswerte) für unseren Anlagenbetrieb in absehbarer Zeit?
- Steht der Ersatz von Anlagenteilen an und kann eine Gesamtoptimierung (z.B. Retrofit) in Betracht gezogen werden?

Checkliste: Wann ist der Einsatz der Pinch-Technologie sinnvoll?

Die Praxiserfahrung zeigt, dass die Anwendung der Pinch-Technologie einen unter Umständen beträchtlichen Aufwand darstellen kann, der nicht unterschätzt werden sollte. Besonderen Nutzen verspricht die Pinch-Technologie, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Komplexere chemische, verfahrenstechnische Anlagen, Prozesse und Werke
- Hoher Einsatz an Kühlmitteln und Brennstoffen
- Einsatz von Wärmerückgewinnungsanlagen
- Hoher Wasserbedarf und Abwasseranfall
- Neuplanung von Anlagen
- Sanierung von Altanlagen (Retrofit)

3 Hinweise zum Leitfaden

Der vorliegende Leitfaden will Ihnen einen Überblick über die wesentlichen Konzepte der Pinch-Technologie geben und in die konkreten Anwendungen im betrieblichen ESSM einführen. Da die Pinch-Methodik auf physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten basiert, werden die Grundlagen der Pinch-Technologie im Anhang näher erläutert.

Der Leitfaden gliedert sich in drei Teile:

- Allgemeine Einführung in die Pinch-Technologie
- Praxisteil mit Beschreibung der Pilotprojekte
- Anhang mit einer Beschreibung der Methodik

Die Pinch-Methodik stammt aus der Verfahrenstechnik und greift daher auf eine Reihe von Fachausdrücken zurück. Die Definitionen der wichtigsten Begriffe seien hier vorab genannt, die restlichen finden sich im Glossar.

Thermodynamik = grundlegende physikalische Theorie der Energieumwandlung bei physikalisch-chemischen Prozessen

Utilities = Hilfsstoffe, Hilfsenergien

Composite-Kurve = Summenkurve aller Energieströme im betrachteten Prozess, in der Anlage oder in der Fabrik

Enthalpie (H) = Zustandsgröße für den Wärmehalt eines physikalischen oder chemischen Systems bei konstantem Druck

Der vorliegende Leitfaden ist das Ergebnis aus vier Pilotanwendungen in unterschiedlichen Branchen, die im Rahmen des umweltpolitischen Schwerpunkts der LfU „Einführung eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements in kleinen und mittleren Unternehmen in Baden-Württemberg“ durchgeführt wurden. Sie sind im zweiten Teil der Broschüre dargestellt und demonstrieren das breite Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten der Pinch-Technologie.

Der Leitfaden dokumentiert die wichtigsten Erfahrungen aus den Pilotvorhaben und zeigt damit konkret, was bei der praktischen Anwendung beachtet werden sollte, um den Erfolg sicherzustellen.

Der Leitfaden will Ihnen eine moderne Methode zur Anlagenoptimierung näher bringen und Ihnen eine Hilfestellung geben, wann und wo der Einsatz der Methode sinnvoll und nützlich sein kann. Weiterführende Informationen finden Sie in den im Anhang aufgeführten Quellen.

4 Eine Einführung in ein ESSM mit der Pinch-Technologie

4.1 Ausgangslage

Industriebetriebe mit physikalisch-chemischen Verfahren und Prozesstechniken – wie beispielsweise Chemie- und Pharmaunternehmen oder Lebensmittel- und Papierhersteller – haben einen beträchtlichen Anteil am Energieverbrauch der Wirtschaft und den damit verbundenen Emissionen. In den vergangenen Jahren gab es vielfältige Bemühungen, diese zu verringern. Neben der direkten Optimierung der technischen Komponenten wird versucht, mit Methoden des Ener-

gie- und Stoffstrommanagements wie z.B. Stoffstromanalysen weitere Einsparpotenziale und Optimierungsmöglichkeiten zu erkennen. Im Bereich von verfahrenstechnischen Anlagen kommen jedoch thermodynamische Randbedingungen zum Tragen, die eine ausgefeiltere Betrachtungsweise erfordern. Eine davon, die Pinch-Technologie ist entwickelt worden, um die Wärmebilanzen in Anlagen ganzheitlich zu analysieren und zu optimieren.

4.1.1 Erweiterung des klassischen ESSM

Genau wie im ESSM betrachtet und analysiert die Pinch-Technologie mengenmäßig die Energie- und Stoffströme in Industrieanlagen. Sie berücksichtigt aber zusätzlich, dass Wärmeenergie nur dann sinnvoll wiederverwendet werden kann, wenn ihr Temperaturniveau für die Folgeprozesse nicht zu niedrig ist. Das Ausbalancieren dieser

qualitativen Aspekte zeichnet die Pinch-Technologie aus. Es ist ein Analysetool, das die optimale Konfiguration ermittelt, und ergänzt so andere Werkzeuge des ESSM. Es fördert gezielt die Mehrfachverwendung in Kaskaden. Das Prinzip kann auch auf Wasserströme mit verschiedenen Reinheitsgraden übertragen werden.

4.1.2 Prozessintegration

Klassische Ansätze der Anlagenoptimierung konzentrierten sich häufig darauf, die Wirkungsgrade einzelner Verfahrensschritte zu erhöhen, und vermeiden es, die Anlagenstruktur als Ganzes zu analysieren und zu optimieren.

Doch die oft teure Erhöhung der Wirkungsgrade durch rein technische Maßnahmen bringt meist weniger ein als das optimale Verknüpfen der Einzelprozesse. Neben den Parametern der Einzelprozesse gilt es also, gezielt die gesamte Prozessstruktur in die Optimierung mit einzubeziehen. Eine systematische Vorgehensweise dazu zeigt die Prozessintegration mithilfe der Pinch-Technologie auf. Die Prozessintegration beschäftigt sich mit dem Zusammenwirken einzelner Prozessstufen in einer Gesamtanlage. Ziel dabei

Die Internationale Energie-Agentur (IEA) definiert Prozessintegration als:

„... systematische und allgemeine Methoden zum Design von Integrierten Produktionsanlagen, vom Einzelprozess bis zum Gesamtstandort, mit besonderer Betonung auf einer effizienten Energienutzung und dem Verringern von Umweltauswirkungen.“

ist, mit den Methoden der Wärme- und Stoffintegration optimale Verknüpfungen der Anlagenteile zu entwickeln. Viele industrielle Prozesse sind zwar komplex und oft ist damit die Scheu verbunden, funktionierende Anlagen zu stark zu verändern. Die Erfahrungen zeigen aber, dass erst dadurch die größten Einsparungen erzielt werden. Die Pinch-Technologie, die im Folgenden näher betrachtet wird, ist eine wirkungsvolle Methode, um eine solche Prozessintegration systematisch einzuführen oder auszubauen.

4.2 Zielsetzungen für den Einsatz der Pinch-Technologie

Die oben aufgeführte Definition der Prozessintegration richtet den Fokus vor allem auf Energieeinsparung und Umweltschutz. Die Pinch-Technologie kann aber auch für eine Reihe

weiterer Zielsetzungen genutzt werden. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die Zielsetzungen, die mit der Pinch-Technologie bei Planung und Design verfolgt werden können:

- Minimieren der **jährlichen Gesamtkosten** durch Festlegung der optimalen Balance zwischen Betriebskosten (Rohstoffe und Energie) und Investitionskosten (Anlagen). In einem zweiten Schritt kann die Pinch-Technologie dann dazu dienen, den Energieverbrauch zu minimieren, die Rohstoffnutzung zu optimieren und die Anlagenkosten zu verringern.
- Erhöhen des **Produktionsdurchsatzes** (Anlagenkapazität) durch Identifikation und Beseitigung von Anlagenengpässen.
- Verbessern der **Regelbarkeit** – eine Eigenschaft des Designs und nicht des Steuerungssystems – durch geschickte Auswahl von Anlagenverbindungen (Topologie) und technischen Parametern unabhängig vom jeweiligen Steuerungssystem.
- Erhöhen der **Flexibilität** bei geplanten Produktionsänderungen (etwa in Bezug auf andere Rohstoffe, Produkte oder Produktionsvolumen), bei unerwünschten Änderungen (wie Wärmetauscherunreinigung oder Katalysatorinaktivierung) oder bei Änderungen der Betriebsbedingungen durch Auswahl geeigneter Anlagenverbindungen und technischer Parameter.
- Verringern der unerwünschten **Anlagenemissionen**, beispielsweise durch reduzierten Einsatz von fossilen Brennstoffen, Einsatz alternativer Energieträger, Schließen von Kreisläufen etc.
- Leisten eines Beitrags für ein **nachhaltiges Wirtschaften**, zu dem sich Industrie und Gesellschaft in den vergangenen Jahren verstärkt verpflichtet haben.

4.3 Nutzen durch die Anwendung der Pinch-Technologie

Die unter 3.2 genannten Zielsetzungen weisen auf eine Reihe von Vorteilen hin, die sich aus der Anwendung der Pinch-Technologie ergeben können. Diese sollen hier ausführlich dargestellt werden.

Stand in den 1980er Jahren vor allem die Energieeinsparung im Fokus der Pinch-Technologie, so kamen während der 1990er Jahre andere industrienähere Aufgabenstellungen dazu, beispielsweise die Betrachtung der Gesamtkosten und Anlagenflexibilität. Darüber hinaus unterstützt die Pinch-Technologie heute aktuelle gesellschaftsbezogene Ziele wie Umweltschutz und Nachhaltigkeit.

Dabei erweist sich das Konzept der Pinch-Technologie vor allem deshalb als besonders vorteilhaft, weil die genannten Aufgabenstellungen einen systematischen Ansatz erfordern. Denn zum einen sind die meisten Anlagen in den Unternehmen der Prozessindustrie komplexe Verbindungen aus zahlreichen unterschiedlichen technischen Komponenten. Zum anderen hängen die Zielsetzungen – von Wirtschaftlichkeit über Betriebssicherheit bis Umweltschutz – stark von der Struktur der Gesamtanlage und den Rahmenbedingungen ab. Isolierte Betrachtungen und Maßnahmen werden daher keinesfalls optimale Ergebnisse nach sich ziehen.

Der integrierte Ansatz der Pinch-Technologie lässt sich hingegen auf verschiedenen Ebenen nutzen:

- Im Bereich der Wärmeintegration ermöglicht sie es, den ökonomisch optimalen Umfang an Wärmerückgewinnung zu bestimmen und das entsprechende Wärmetauschernetzwerk mit minimalem Kostenaufwand zu betreiben.
- Im Bereich des gemischten Kraft-Wärme-Einsatzes ermöglicht sie es, die ökonomisch optimale Dampfmenge und -qualität für Dampferzeuger wie -verbraucher festzulegen und Potenziale zur Kraft-Wärme-Kopplung zu finden. Weil die Pinch-Technologie auf grafischen Auswertungen und systematischen Methoden basiert, erlaubt sie es zudem, den thermodynamisch „korrekten“ und ökonomisch optimierten Einsatz von Wärmepumpen zu ermitteln.
- Im Bereich der Anlagenproduktivität ermöglicht sie es, Engpässe im Produktionsdurchsatz zu beseitigen. Dies schließt Situationen ein, in denen das Energiesystem den Stoffstrom im Prozess begrenzt – ein Szenario, das z.B. in Ölraffinerien auftritt, wenn die Erhitzer an der Kapazitätsgrenze operieren. Darüber hinaus kann die Pinch-Technologie helfen, teure

Investitionen in das Energieversorgungssystem zu vermeiden, indem sie die Wärmerückgewinnung verbessert.

- Im Bereich der Betriebssicherheit und -flexibilität lautet die Kernfrage, wie die einzelnen Anlagenteile innerhalb des Prozesses verbunden sind (Anlagentopologie). Die Pinch-Technologie legt eine starke Betonung auf die Prozessstruktur und ist daher ein wertvolles Hilfsmittel, um verfahrenstechnische Fragen zu beantworten. Eine hohe Anlagenflexibilität, die üblicherweise durch Überdimensionierung der Ausrüstung sichergestellt wird, kann durch die Pinch-Technologie mit minimalen Investitionen erreicht werden.
- Im Bereich des Umweltschutzes und des nachhaltigen Wirtschaftens ist die Pinch-

Technologie eine systematische Methode, um gesetzlichen Vorgaben und gesellschaftlichen Erwartungen zu begegnen und gleichzeitig die dafür notwendigen Investitionen zu minimieren. Der direkte Nutzen liegt dabei beispielsweise in Emissionsminderungen und Abwasserreduzierungen, was meist auch weniger Frischwasserverbrauch bedeutet.

Zudem erwähnenswert ist der Zusatznutzen von systematischen und systemorientierten Methoden und Werkzeugen, wie sie die Pinch-Technologie umfasst. Selbst wenn sich im Einzelfall keine signifikanten Einsparungen erzielen lassen, so schärft die Pinch-Technologie doch das Bewusstsein der Anwender für die Thematik und vergrößert das Wissen über die Wechselwirkungen in einer Anlage.

4.4 Anwendungsgebiete für die Pinch-Technologie

Da die Pinch-Technologie vorrangig eine systemorientierte Methode ist, sind die größten Nutzeffekte und Einsparungen für komplexe Prozesse und Anlagen der Chemieindustrie zu erwarten. Aber auch scheinbar kleine und einfache Prozesse in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie

sind hinreichend komplex, um Methoden der Pinch-Technologie interessant und wertvoll zu machen. Andere Industriezweige, in denen die Pinch-Technologie schon erfolgreich angewendet wurde, sind die Papierherstellung, die Pharmabranche und die Metallerzeugung.

4.4.1 Der Einsatz in Wärmesystemen

Die Pinch-Technologie bietet sich vorrangig für das Prozessdesign beim Neu- oder Umbau von Anlagen an. Aber auch bestimmte Aspekte der Anlagenplanung und des Anlagenbetriebs können mit ihr optimiert werden. Die Methoden der Pinch-Technologie sind allgemein gültig und sowohl auf kontinuierliche Prozesse, gemischte Prozesse als auch Chargenbetrieb anwendbar. Bei letzteren sind die Beziehungen zwischen Design, Planung und Betrieb (kurzfristig betrachtet) besonders ausgeprägt.

In Detailfragen lässt sich die Pinch-Technologie ebenfalls einsetzen für den Entwurf oder die Modifikation

- von Reaktorsystemen,
- von Trennungssystemen (insbesondere wärmegeführte Destillationskolonnen, Trockner und Verdampfer),

- von Wärmetauschernetzwerken und
- von (Energie-)Versorgungssystemen (Dampf auf verschiedenen Niveaus, gefeuerte Heizkessel, Kühlanlagen etc.).

Die Methoden zum Design optimaler Prozesswärmesysteme umfassen auch den Einsatz von Wärmepumpen und Wärmemaschinen (Gas, Dampf, Dieselmotoren).

In jüngerer Zeit ist die Pinch-Technologie auch erfolgreich in Stoffsystemen eingesetzt worden, beispielsweise zur Abwasserminimierung und zum Design von Wasserbehandlungsanlagen. Wegen ihrer analogen Betrachtung von Energie- und Stoffströmen empfiehlt sich die Pinch-Technologie zudem für das Design von Stoffstromnetzen, die aus Anlagenteilen wie Absorbern und Extraktoren bestehen.

4.4.2 Der Einsatz in Stoffsystemen

Eine weitere Anwendung der Pinch-Technologie ist die Optimierung von betrieblichen Wasser- und Abwassersystemen. Hier lässt sich die Pinch-Technologie (Water-Pinch) für die Auslegung von Wasser- und Abwasserströmen und die Auswahl von Aufbereitungsmethoden anwenden.

Eine ganz aktuelle Anwendung der Pinch-Technologie ist das Design oder Re-Design von Wasserstoffsystemen, auf die in diesem Leitfaden aber nicht näher eingegangen wird.

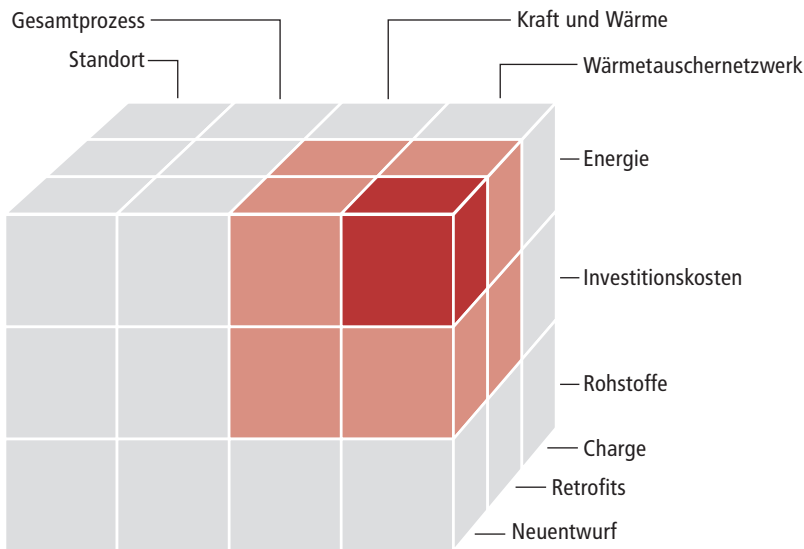


Abb. 4.1: Die Pinch-Technologie und ihre Anwendungsgebiete

Bekannte Anwendungsbereiche der Pinch-Technologie

- Planung, Design und Betrieb von verfahrenstechnischen Prozessen und Versorgungssystemen
- Kurzfristige (operative) und langfristige (strategische) Planung
- Neuanlagen und Retrofit-Projekte
- Effizienzsteigerung (Energie sowie Roh- und Hilfsstoffe) und Erhöhung der Produktivität (Beseitigung von Engpässen)
- Kontinuierliche, semikontinuierliche und Batch-Prozesse
- Alle Arten von Prozessanlagen wie Reaktoren, Separatoren, Wärmetauschernetzwerke
- Integration von Prozessen und Utility-Systemen
- Integration von Prozessen sowie Stoff- und Energieströmen
- Integration aller Prozesse eines Produktionsstandorts
- Betriebsaspekte (Flexibilität, Kontrollfähigkeit und Umrüstbarkeit)
- Wasser- und Abwasserminimierung
- Emissionsminderung

4.5 Spezielle Anwendungen

Naheliegende Zielsetzungen bei der Anwendung der Pinch-Technologie sind beispielsweise: Betriebskosten zu senken, Emissionen zu reduzieren, Abwassermengen zu minimieren und die

Effizienz zu steigern (s. Abb. 4.3). Je nach Anwendung existieren weitere Zielsetzungen, die nicht direkt ersichtlich sind und im Folgenden beschrieben werden.

4.5.1 Bau neuer Anlagen

Unabhängig davon, welcher Hilfsstoff betrachtet wird (Energie, Wasser oder Prozessgase), lässt sich mithilfe des strukturierten Pinch-Konzepts der minimale Versorgungsbedarf von neuen Anlagen ermitteln. Darüber hinaus ermöglicht es das Konzept, die optimale Integration in das vorhandene Versorgungssystem festzulegen. Darauf aufbauend lässt sich feststellen, ob und welche zusätzlichen Versorgungskapazitäten und Investitionen erforderlich sind.

Beispielsweise kann die Pinch-Technologie dazu genutzt werden, die neue Anlage so zu entwerfen, dass vorrangig Hilfsstoffe zum Einsatz kommen. Dadurch lassen sich die Kosten für ein zusätzliches Versorgungssystem vermeiden. Zudem ermöglicht es die Pinch-Technologie, beim Bau neuer Anlagen die Kapazität der Versorgungssysteme so zu planen, dass der benötigte Energiebedarf des Standorts genau gedeckt wird.

4.5.2 Steigern des Durchsatzes – Erfüllung neuer Produktspezifikationen

Den Durchsatz zu steigern oder neue Produktspezifikationen zu erfüllen kann – ähnlich wie die Installation neuer Anlagen – zusätzliche Anforderungen an das Versorgungssystem stellen. Dies könnte in zweierlei Hinsicht Konsequenzen haben: zum einen höhere Betriebskosten und zum zweiten das Erreichen der Leistungsgrenze des Versorgungssystems.

Beispielsweise ist es meist mit hohen Kosten verbunden, wenn im Abwassersystem zusätzliche Kapazitäten für die Abwasserbehandlung erforderlich werden. Durch Anwendung eines Water-Pinchs lässt sich der Investitionsbedarf für zusätzliche Kapazitäten nachweislich verringern oder sogar vollständig vermeiden.

Ähnliches gilt für Energiesysteme, bei denen ein höherer Durchsatz neue Kesselanlagen erforderlich machen kann. Ein häufiges Problem ist die begrenzte Kühlkapazität, wenn die Kühlung mit Flusswasser erfolgt. Durch Anwendung der Pinch-Analyse auf das Energiesystem lassen sich Maßnahmen entwickeln, um den Verbrauch von Heiz- und Kühlmitteln zu senken und so hohe Investitionen zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren.

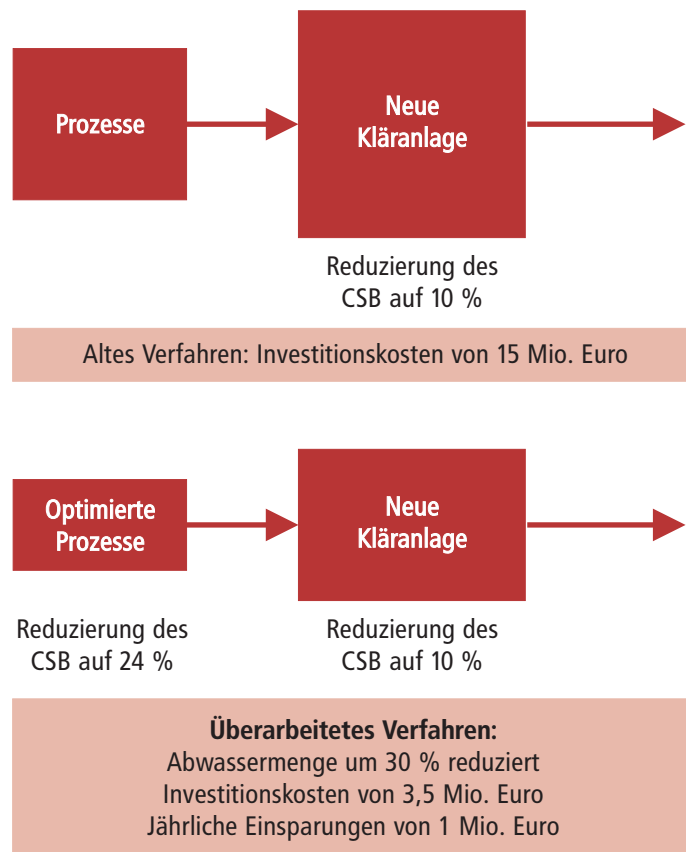


Abb. 4.2: Beispiel für die Vermeidung zusätzlicher Abwasserkosten

4.5.3 Steigern der Leistung des Versorgungssystems am Standort

Das Versorgungssystem (Wärme, Dampf, Kälte) nimmt im Anlagenbetrieb eine zentrale Stellung ein. Häufig jedoch wird es als peripheres Element betrachtet, weil Energie billiger ist, als es die hergestellten Produkte sind. Demzufolge wird das Versorgungssystem nicht optimal betrieben, so lange der gewünschte Produktdurchsatz erreicht werden kann.

Mithilfe der „Total-Site“-Analyse lassen sich für einen ganzen Standort Ineffizienzen beim Einsatz von Hilfsstoffen identifizieren und Pläne zur Nutzung des vorhandenen Potenzials aufstellen. In vielen Fällen ist es möglich, die Versorgung der Verbraucher mit Dampf stabil zu halten und gleichzeitig die vorhandenen Dampfturbinen zur Stromerzeugung zu nutzen.

4.5.4 Planen und Senken der Investitionsausgaben

Bei der Mehrheit der oben genannten Punkte liegt das Hauptaugenmerk darauf, Investitionsausgaben zu vermeiden. Es lässt sich jedoch leicht argumentieren, dass ein bestimmtes Projekt zwar die Probleme von heute lösen mag, jedoch nicht die von morgen. Was sich langfristig als die vorteilhafteste Investition erweisen wird, ist schwierig festzustellen angesichts der Fülle

externer Einflüsse wie neue Umweltschutzgesetze, geplante Steuern und veränderte Versorgungsstarife oder auch Expansionspläne von Unternehmen, die Installation neuer Anlagen sowie die Schließung alter Werke. Dieses Problem erstreckt sich auch auf die Planung von solchen Investitionen, mit denen die Strategie des Unternehmens umgesetzt werden soll.

4.6 Die grundlegende Idee des Pinch-Konzepts

Im Allgemeinen gilt für verfahrenstechnische Prozesse, dass hochwertige Hilfsstoffe wie Dampf und Reinwasser in sie einströmen und als Abwärme bzw. Abwasser aus ihnen abfließen. Im Fall von Energie wird beispielsweise teures Erdgas zugeführt, um den Prozess mit Hochtemperaturwärme zu versorgen. Die verbleibende Abwärme wird dann in Kühlwassersysteme oder die Luft abgeleitet. Im Fall von Wasser fließt sauberes

bzw. gereinigtes Wasser in den Prozess ein, das anschließend als verunreinigtes Abwasser in Aufbereitungsanlagen landet.

Das grundlegende Prinzip der Pinch-Technologie ist es nun, die individuelle Nachfrage, z.B. den Wärmebedarf, mit einem angemessenen Angebot wie z.B. nutzbare Abwärme möglichst gut auszugleichen. Da prinzipiell Energie oder Hilfs-

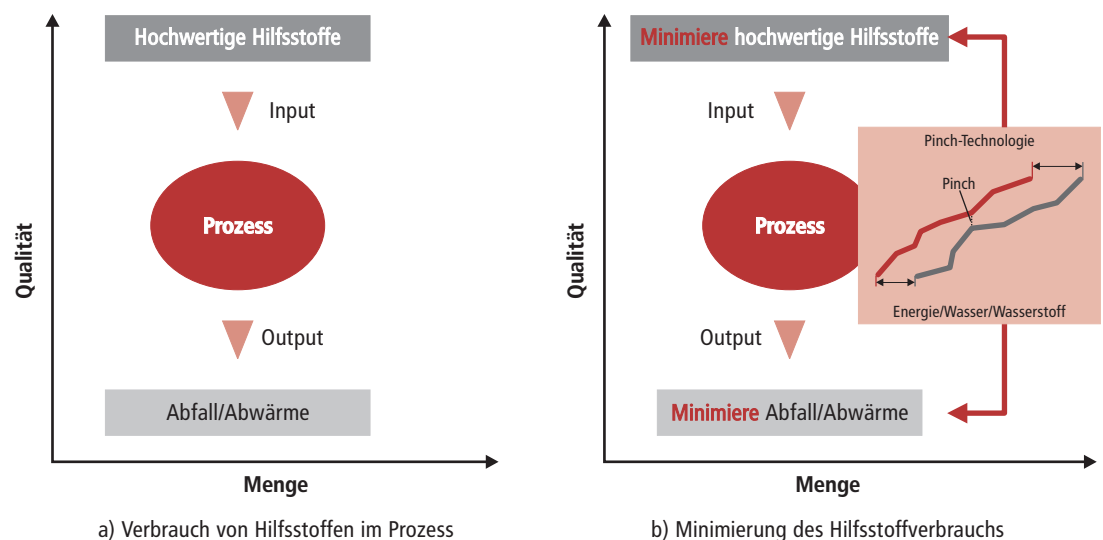


Abb. 4.3: Die Pinch-Technologie optimiert Prozesse an verschiedenen Stellen

stoffe wie Wasser nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden, lässt sich dieser Ausgleich grundsätzlich dadurch erreichen, dass man Kreisläufe schließt. Allerdings hängt die Eignung für diesen „Handel“ nicht nur von der verfügbaren Energie- und Hilfsstoffmenge ab, sondern auch von der erforderlichen Qualität. Im Zusammenhang mit dem Konzept der Pinch-Technologie wäre die Qualität im Fall der Wärme ihre Temperatur oder im Fall von Wasser seine Reinheit.

Durch einen bestmöglichen Ausgleich von Angebot und Nachfrage lässt sich also der Einsatz der notwendigen Hilfsstoffe minimieren. Der Wärme-Pinch gibt beispielsweise den kleinstmöglichen Bedarf von Heizmitteln und Kühlmitteln an. Er folgt aus einer Optimierung der „Wärmekaskade“ von hohen Temperaturen (teuer) zur Umgebungstemperatur und von der Umgebungstemperatur bis zu Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts (wiederum teuer).

Fünf Prinzipien bei der Betrachtung von Pinch-Problemen:

1. Prozesse können in Bezug auf Angebot und Nachfrage (Quellen und Senken) von Waren (Brennstoffe oder Frischwasser) betrachtet und analysiert werden.
2. Die optimale Lösung wird bei einem angemessenen Abgleich von Angebot und Nachfrage erreicht.
3. Der entscheidende Parameter, der bestimmt, welche Anordnung sich am besten eignet, ist die Qualität (Temperatur oder Reinheit).
4. Je mehr ineffiziente Transfers stattfinden, desto mehr kostspielige Ressourcen müssen eingesetzt werden.
5. Nur ein vollständiger Überblick über den Prozess hilft, Ineffizienzen zu erkennen und geeignete Anordnungen von Quellen und Senken zu bilden. Er bildet die Basis für eine optimale Lösung.

Übertragen auf einen verfahrenstechnischen Prozess mit Wärmeeinsatz bedeutet dies: In einem Prozess gibt es heiße Stoffströme, die abgekühlt werden müssen, und kalte Stoffströme, die erwärmt werden müssen. Die optimale Lösung kombiniert heiße und kalte Ströme so, dass der Bedarf an teurer Heiz- bzw. Kühlenergie (Utilities) minimiert wird.

Der so genannte Pinch unterteilt die in einem Diagramm dargestellte Wärmebilanz in zwei Bereiche (s. Abb. 4.4). Er wird durch die minimale Temperaturdifferenz bestimmt, die in einem Wärmetauscher zulässig ist (s. Anhang).

Die grundlegende Idee besteht also

- im Ausgleich von Angebot und Nachfrage zwischen Wärmequellen und -senken,
- in der geschickten Wiederverwendung von Abwärme und Brauchwasser durch Kreislauf-führung und Pufferung nach dem Kaskadenprinzip (von einer hohen zu einer niedrigen Qualität),

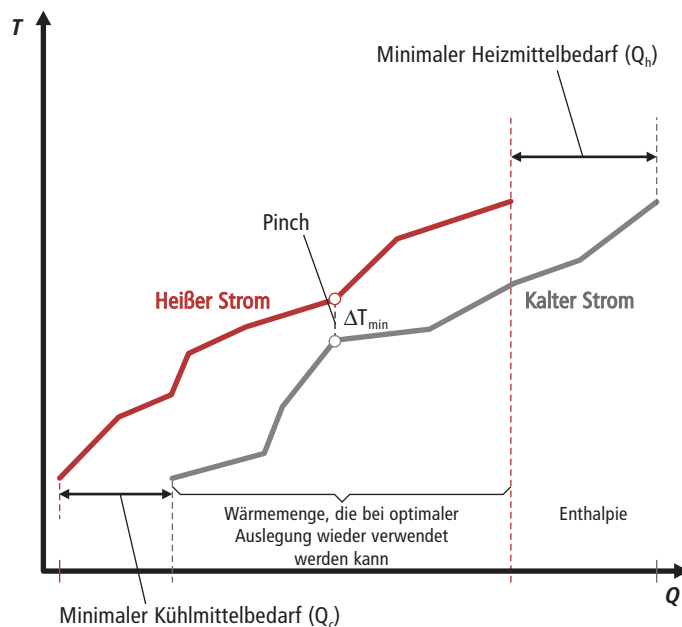


Abb. 4.4: Darstellung einer Wärmebilanz in der Pinch-Technologie

- in der Vermeidung von unnötigen Energie- oder Stofftransfers über den Pinch hinweg.

4.7 Elemente des Pinch-Konzepts

4.7.1 Der Wärme-Pinch

Die Pinch-Technologie wurde ursprünglich nur für Wärmetauschersysteme entwickelt, hat sich aber bald als Auslöser einer umfassenden Prozessintegration entpuppt. Tatsächlich war die Entdeckung des Wärme(rückgewinnungs)-Pinches der wesentliche Durchbruch, als es darum ging, Analyse- und Designmethoden zu entwickeln, die zu einer effektiven Energienutzung für Prozesse und Standorte führen. Als besonders geeignet erwies sich die Pinch-Technologie vor allem deshalb, weil es durch den Pinch-Punkt möglich wurde, die Energiebilanz einer verfahrenstechnischen Anlage in zwei separate Bereiche zu zerlegen. Diese lassen sich dann getrennt voneinander optimieren. Ein unnötiger Wärmefluss zwischen diesen Bereichen zeigt eine erste Ineffizienz auf.

Eines der wichtigsten Werkzeuge der Pinch-Technologie ist die Analyse von so genannten Composite-Kurven (zusammengesetzte Summenkurven). Sie zu erstellen ist nicht ganz einfach. Die Arbeit des Modellierens und Analysierens lässt sich aber mit einer Reihe von

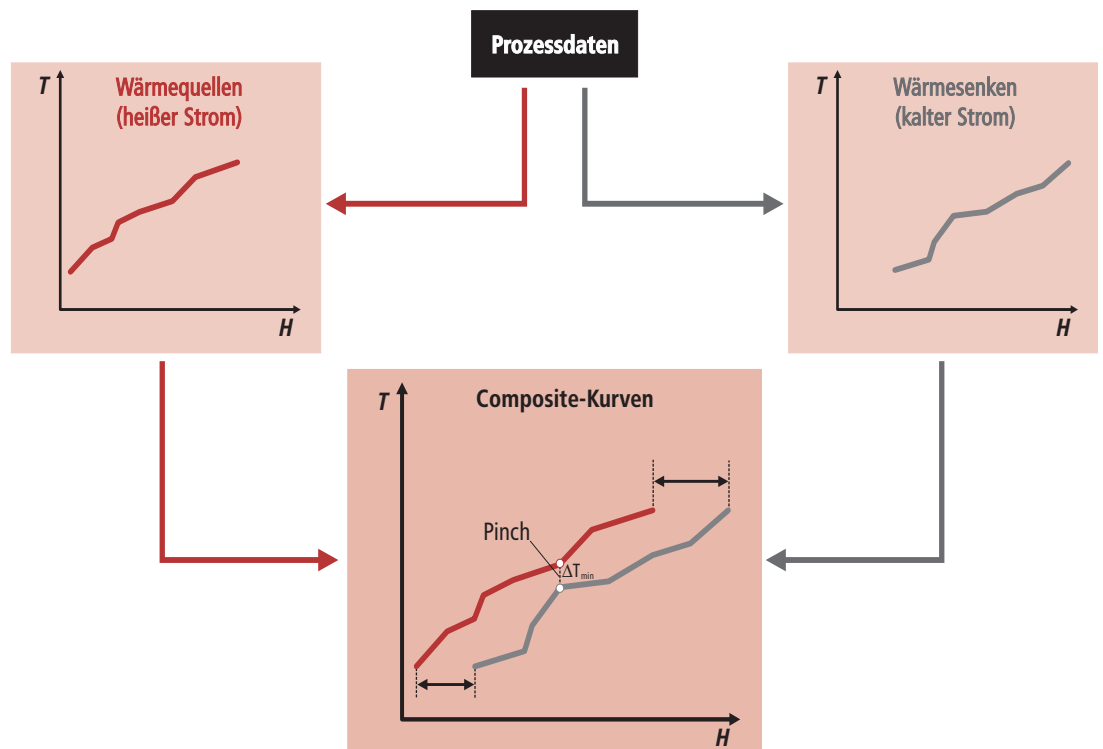
Software-Tools wirkungsvoll unterstützen. Zunächst gilt es, die Prozessströme in Quellen und Senken einzuteilen, was im Fall von Energie den heißen und kalten Strömen entspricht.

Die heißen Ströme werden dann in Bezug auf die Qualität (Temperatur) und die Menge (Wärmeleistung) dargestellt. Die resultierende Kurve zeigt die Wärmemenge im Prozess und den Temperaturbereich, über den sie zur Verfügung steht. Eine identische Darstellung für die kalten Ströme zeigt den Kühlbedarf des Prozesses.

Durch die Kombination dieser Darstellungen ergibt sich in der Regel ein Bild mit zwei Kurven, das eine Engstelle oder auch Einschnürung (engl. Pinch) aufweist.

Der „Pinch“, nach dem diese Technologie benannt ist, ist der Punkt der größten Annäherung zwischen den beiden Composite-Kurven im Diagramm. Er entspricht der kleinsten möglichen Temperaturdifferenz (ΔT_{\min}) der Wärmetauscher, die technisch sinnvoll ist.

Abb. 4.5: Ableitung von Composite-Kurven aus den Wärmequellen und Wärmesenken. Composite-Kurven sind Darstellungen der kalten und warmen Ströme im Prozess in einem Temperatur(T)-Enthalpie(H)-Diagramm.



4.7.2 Die Pinch-Zerlegung

Beim Versuch, die Wärmerückgewinnung zu maximieren und so den Heiz- und Kühlenergiebedarf zu minimieren, werden die beiden Profile (Composite-Kurven) horizontal aufeinander zu bewegt – so lange, bis am Pinch-Punkt die kleinste zulässige Temperaturdifferenz ΔT_{\min} erreicht ist. Der Pinch entspricht dem Flaschenhals im Prozessdesign – also jenem Bereich, in dem die Kräfte, die zum Wärmeaustausch nötig sind, ihr Minimum erreichen. Oberhalb des Pinchs ist der Prozess (oder die Anlage) im Wärmedefizit – also

in einem Bereich, in dem nicht genügend Wärme mit ausreichend hoher Temperatur (oder Qualität) verfügbar ist. Entsprechend ist der Prozess unterhalb des Pinchs im Wärmeüberschuss.

Ist die reale Temperaturdifferenz am Pinch größer als die theoretisch mögliche, dann existiert ein zusätzlicher Wärmefluss über den Pinch hinweg, welcher zu einem unnötigen Wärme- und Kältebedarf führt. Hier zeigt sich dann ein erstes Optimierungspotenzial.

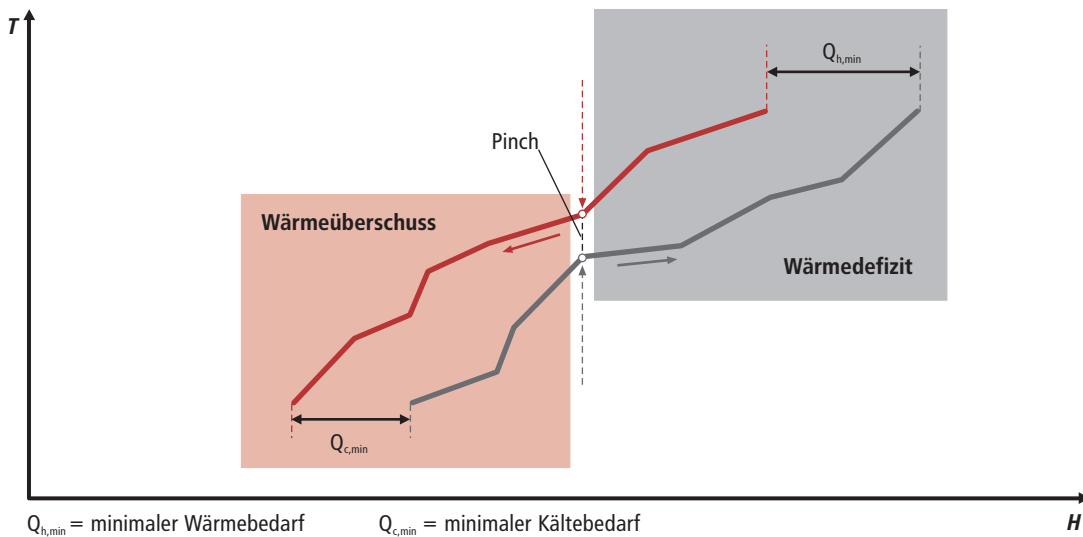


Abb. 4.6: Grundlegende Pinch-Zerlegung in zwei getrennte Bereiche

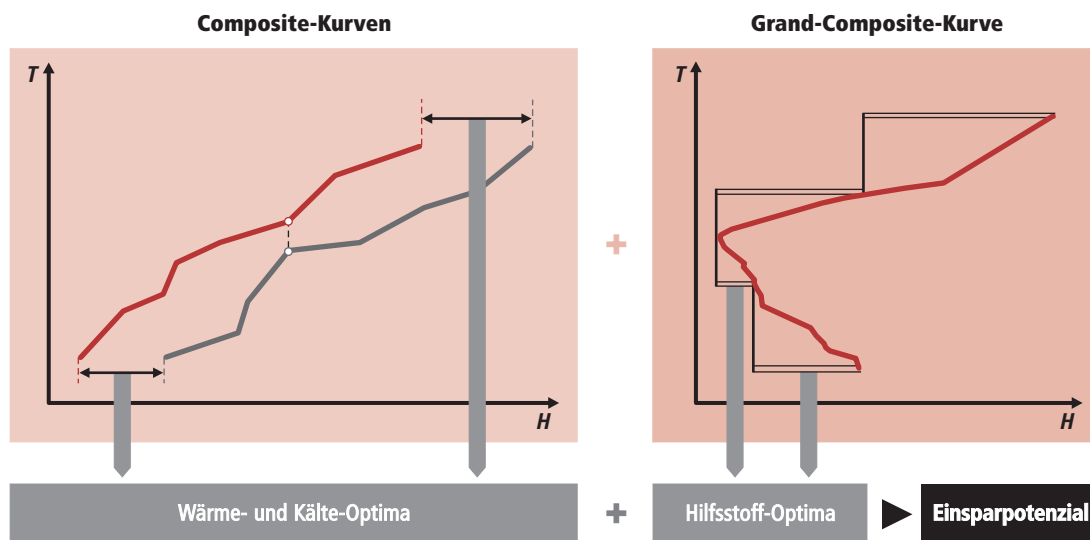


Abb. 4.7: Die Analyse der Composite-Kurven und der Grand-Composite-Kurve liefern Einsparziele für den allgemeinen Energieverbrauch und zeigen den zweckmäßigsten Einsatz der verfügbaren Hilfsstoffe auf.

Aus der Ableitung der Composite-Kurven entsteht die so genannte Grand-Composite-Kurve. Sie ermöglicht es, Einsparziele für die einzelnen Hilfsstoffe (s. Abb. 4.6 u.4.7) festzulegen. Jede Maßnahme zur Wärmeintegration muss diese grundlegende „Pinch“-Zerlegung berücksichtigen. Konkret bedeutet das: beim Wärmeaustausch von Prozess zu Prozess, bei der Integration von Verdampfern oder beim Einsatz von Wärmepumpen gilt es, passende Wärmequellen mit ausreichender Temperatur mit Wärmesenken niedrigerer Temperatur zu kombinieren. Nur Maßnahmen, die diese simple Regel berücksichtigen, führen zu einer Energieeinsparung.

Aus dem Wärme(rückgewinnungs)-Pinch lassen sich Erkenntnisse darüber ableiten, welche Optimierungsziele (Performance Targets) bezüglich der Minimierung des Energieverbrauchs ($Q_{h,min}$ und $Q_{c,min}$), der geringsten Anzahl von Wärmetauschern (U_{min}), der minimalen Gesamtwärme-

austauschfläche (A_{min}), der minimalen mechanischen Arbeit in den Kühlaggregaten (W_{min}) und der minimalen Emissionen bestehen.

Der Wärme-Pinch im Wärme(rückgewinnungs)-Bereich gilt als die wichtigste Anwendung der Pinch-Technologie in den vergangenen 25 Jahren. Aus ihm heraus sind mittlerweile eine Reihe von weiteren Anwendungen entstanden. Diese beruhen in erster Linie darauf, dass der grundsätzliche Ansatz der Pinch-Technologie – die Qualität einer Menge grafisch akkumuliert als Composite-Kurve darzustellen – sich gut auf andere Felder der Verfahrenstechnik übertragen lässt. So wie der Temperaturunterschied die treibende Kraft für den Wärmeaustausch ist, so ist der Motor in Prozessen mit Massentransfer die Konzentrationsdifferenz – oder präziser: die Differenz des chemischen Potentials. Daraus ist eine eigenständige Methode für das Design von Netzwerken mit Stoffströmen entstanden.

4.7.3 Der Wasser-Pinch

Eine spezielle Anwendung dieser Analogie zwischen Wärmetransfer und Massentransfer wurde für das Abwassermanagement entwickelt. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Menge des verbrauchten Frischwassers ebenso signifikant reduzieren wie die des erzeugten Abwassers. Die zugrunde liegende Methode, auch Wasser-Pinch genannt, schließt Wasserkreisläufe und optimiert dadurch den Einsatz, die Wiederverwendung und die Wiederaufbereitung des Wassers. Der Wasser-Pinch lässt sich auch auf das Design von verteilten Anlagen zur Abwasseraufbereitung anwenden.

Der wesentliche Unterschied zwischen Wärme- und Wasser-Pinch liegt in der Definition der Qualität. Bei der Energie ist sie durch einen Parameter, die Temperatur definiert. Die Differenz zwischen der Prozess- und der Umgebungstemperatur ist ein Maß für den Wert dieser Energie. Ein weiterer Unterscheidungsparameter ist nicht erforderlich. Bei Wasser wird die Reinheit durch eine Vielzahl von Stoffen bestimmt, die Qualität ist in der Regel mehrdimensional. Demnach können mehrere Parameter erforderlich sein, um die Qualität zu definieren, für Wasser etwa pH-Wert, Leitfähigkeit, Gesamtschwebstoffe oder der chemische Sauerstoffbedarf (CSB).

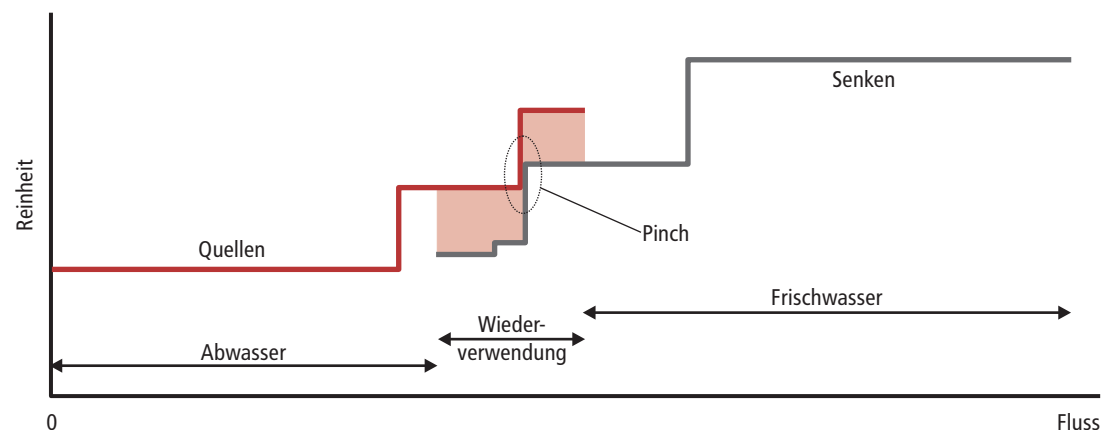


Abb 4.8: Darstellung der Composite-Kurven im Wasser-Pinch

5 Vorgehensweise

5.1 Festlegung von Optimierungszielen vor dem Prozessdesign

Während beim traditionellen Prozessdesign oft auf Erfahrungswissen zurückgegriffen und versucht wird, die Anlagen direkt zu optimieren, verfolgt die Pinch-Technologie einen allgemein gültigen, zweistufigen Ansatz. Dabei werden zuerst die Optimierungsziele ermittelt und benannt – also beispielsweise der optimale Energie- und Stoffverbrauch, die ideale Anzahl von Wärmetauschern, die minimale Brauchwassermenge, die maximale Energieerzeugung oder die minimalen Emissionen. Diese Optimierungsziele gilt es, anschließend im Prozessdesign schrittweise und systematisch zu realisieren.

Die Pinch-Technologie erlaubt es schon vor der eigentlichen technischen Planung, die optimale Auslegung der Anlagen zu bestimmen und Optimierungsziele festzulegen. Auf diese Weise gibt die Pinch-Technologie im Vorfeld Auskunft über die maximal erreichbaren Werte für die gesamte betrachtete Anlagenkonfiguration. Damit erlaubt sie es dem Anlagenbetreiber, den optimalen Kompromiss zwischen den verschiedenen Zielen zu finden – zum Beispiel den besten Ausgleich zwischen Anlageninvestitionen und Betriebskosten.

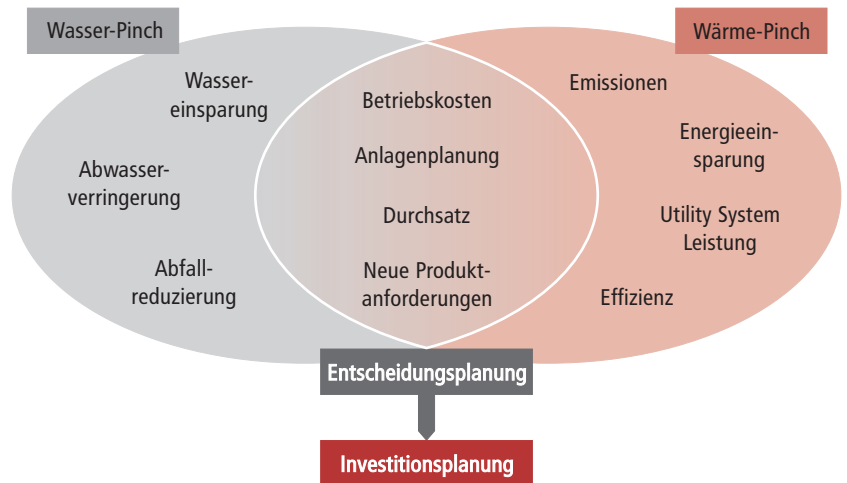


Abb. 5.1: Verschiedene Zielsetzungen für Wasser- und Wärme-Pinch.

Kurz: die Pinch-Technologie bietet die Möglichkeit,

- jedes vorhandene Prozessdesign mit dem theoretisch bestmöglichen zu vergleichen,
- eine betriebswirtschaftlich sinnvolle Vorgehensweise für die Erneuerung von Anlagen zu bestimmen (s. Abb. 5.4).

5.2 Vorgehensweise in Phasen

Wenn es darum geht, sich komplexen Systemen zur Versorgung mit Energie, Wasser und Wasserstoff zu nähern, empfiehlt es sich, das Problem in zwei Phasen, die Analyse und die Synthese, aufzuteilen.

Abbildung 5.2 zeigt eine Übersicht über die Aufgaben, die normalerweise während einer typischen Pinch-Studie durchgeführt werden. Die roten Kästchen kennzeichnen Aktivitäten, die mit der Pinch-Technologie in Verbindung stehen, die grauen Kästchen kennzeichnen Aktivitäten, die generell einen bestimmten Input vom Unternehmen erfordern. Aus der Entwicklung von Projektideen kann sich die Notwendigkeit ergeben, eine verfeinerte Modellierung vorzunehmen.

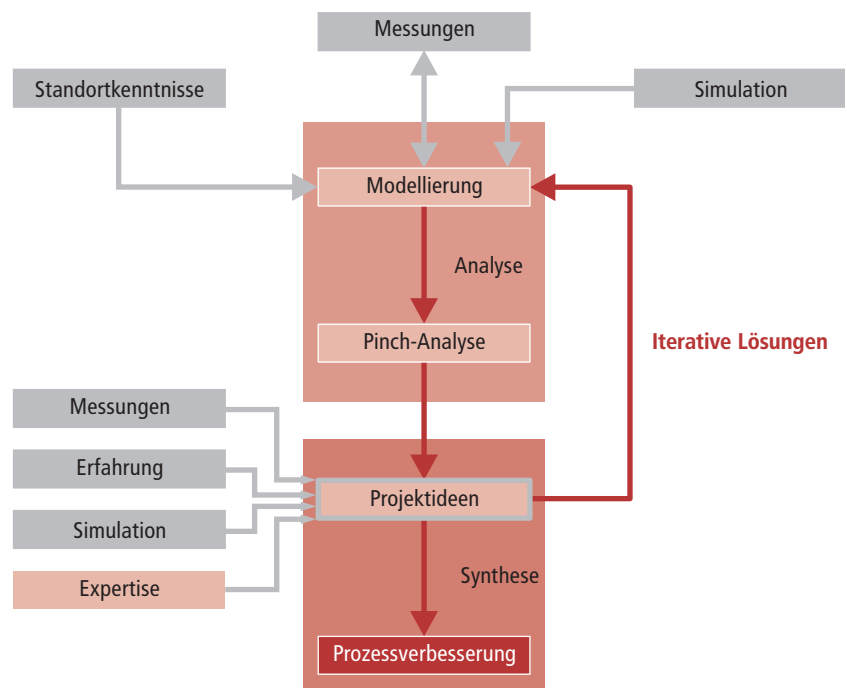
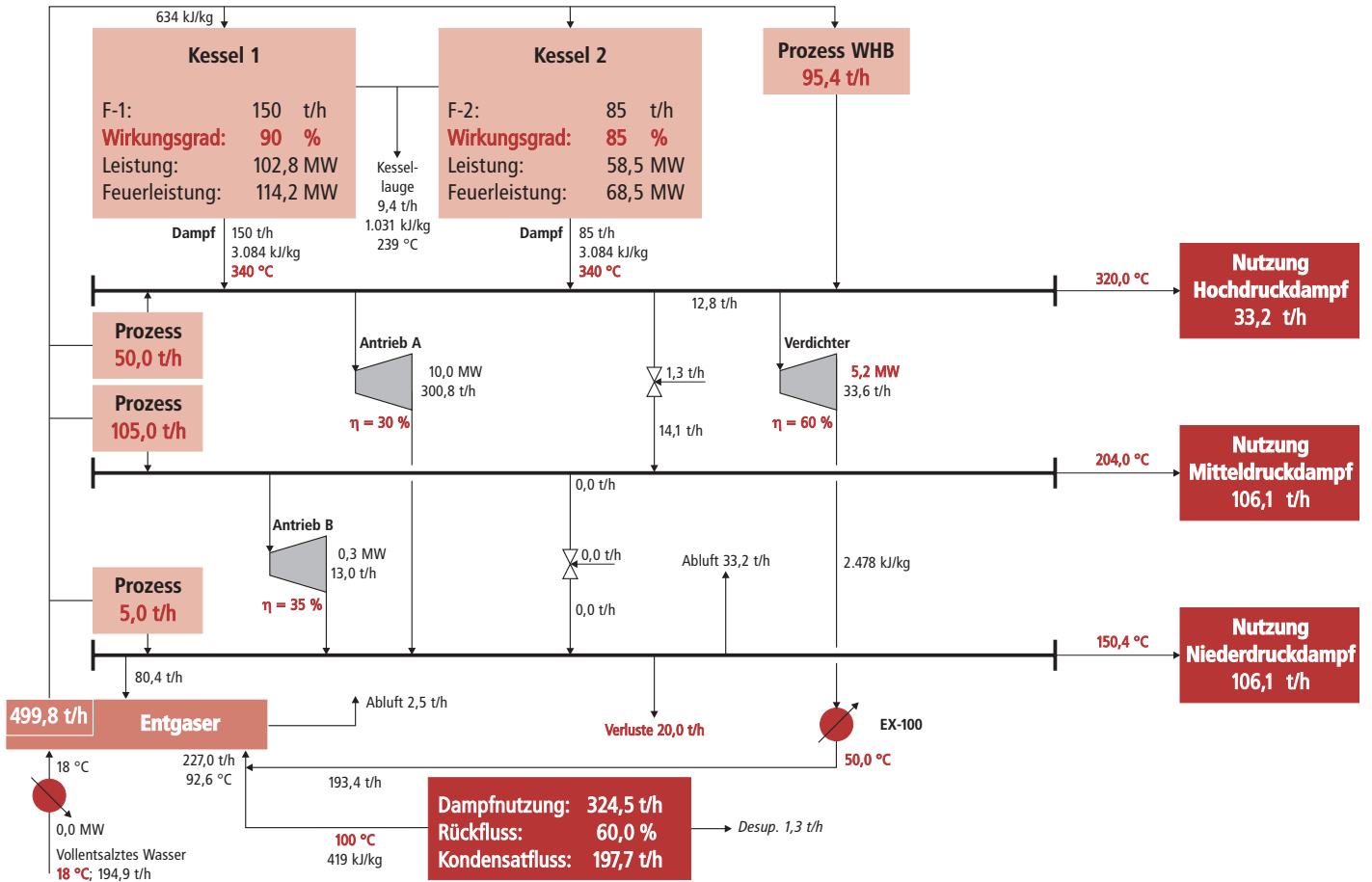


Abb. 5.2: Strukturierte Vorgehensweise bei der Anwendung der Pinch-Technologie

5.2.1 Die Analyse

Am Beginn jeder Analyse steht die Aufgabe, Daten zu sammeln und diese zu überprüfen. Als Quellen können sowohl Messungen im Anlagen-

betrieb als auch Simulationsdaten oder Entwurfsdaten dienen:



Kesseldaten		
Feuerleistung	182,7	MW

Strombedarf am Standort		
Erzeugung	15,5	MW
Bezug	44,5	MW
Strombedarf	60,0	MW

Basisdaten		
Heizöl	9	€/Gcal
Strombedarf	35	€/MWh
Stromexport	25	€/MWh
Wasser	0,25	€/t
Betrieb	8.000	h/a
Heizöl	11,31	Mio. €/Jahr
Strom	12,46	Mio. €/Jahr
Wasser	0,39	Mio. €/Jahr
Gesamt	24,16	Mio. €/Jahr
Basisfall	24,16	Mio. €/Jahr
Einsparungen	0,00	Mio. €/Jahr

Abb. 5.3: Beispiel für das Modell eines Versorgungssystems

- Messungen beschreiben den Ist-Prozess, so wie er derzeit abläuft. Daher bilden sie die zweckmäßigste Grundlage, um Verbesserungsvorschläge zu beurteilen. Häufig können jedoch Widersprüche zwischen einzelnen Messungen auftreten.
- Die Simulation liefert eine einheitliche Wärme- und Massenbilanz und stellt deshalb die beste Datenquelle für eine Studie dar. Die Entwicklung von Simulationsmodellen kann jedoch mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden sein. Wenn nicht bereits Simulationen verfügbar sind, empfiehlt es sich daher häufig, zunächst Messdaten zu verwenden. Bei der Analyse kann sich jedoch herausstellen, dass für bestimmte Bereiche eine zusätzliche Simulation nützlich wäre.
- Entwurfsdaten bilden die Grundlage für alle Änderungsvorschläge. Die aus ihnen entwickelten Modelle erlauben Aussagen darüber, was mit den vorhandenen Anlagen erreicht werden kann und welche zusätzlichen Anlagen gegebenenfalls erforderlich sind.

In dieser Phase spielt der Input der Verfahrenstechniker eine wesentliche Rolle – in erster Linie, um auf Grundlage ihrer Erfahrung mit dem Anlagenbetrieb die Gültigkeit der Daten zu beurteilen. Anlagentechniker und Betriebsingenieure können aber auch Randbedingungen der Prozesse am besten definieren, denn sie kennen beispielsweise die maximale Einlasstemperatur für eine Anlage oder die Druckgrenzwerte. Darüber hinaus sind sie vertraut mit der Prozessdynamik – also mit Faktoren wie beispielsweise Verschmutzung oder Verkokung.

Alle diese Informationen finden Verwendung beim Entwickeln von Modellen des Prozesses. Diese können von einfachen Massenbilanzen bis zu genauen Simulationen reichen, die sich sowohl auf das Prozess- als auch auf das Versorgungssystem beziehen. Neben traditionellen

Die Modellierung von Prozessen dient folgendem Zweck:

- **Modelle helfen beim Verständnis der Probleme**
Häufig lassen sich die Wechselwirkungen in einem Prozess- oder Versorgungssystem nur durch den Einsatz von Modellen einschätzen. Dabei stellt sich mitunter heraus, dass eine Betriebsphilosophie, die intuitiv erscheint, tatsächlich ineffizient ist, was dann zur Entwicklung eines neuen Konzepts führt.
- **Modelle simulieren Prozessänderungen**
Bevor ein Prozess geändert wird, ist es wichtig zu wissen, was passieren wird. Beispielsweise kann es äußerst vorteilhaft erscheinen, den Betriebsdruck einer Destillationskolonne zu ändern, um die Wärmeintegration zu verbessern. Dies setzt allerdings voraus, dass die Kolonne unter den neuen Bedingungen ihre gegenwärtige Leistung weiterhin erbringen wird.
- **Modelle ermitteln Kosten**
Modelle helfen, wenn es darum geht, die tatsächlichen Kosten von Hilfsstoffen zu ermitteln und die Bereiche zu identifizieren, die das größte Verbesserungspotenzial in sich bergen.
- **Modelle kontrollieren die Ergebnisse**
Modelle können bestätigen oder widerlegen, dass die geplanten Änderungen im Einklang mit den Betriebsgrenzen vorhandener und neuer Anlagen stehen und eine reale Einsparung erzielen.

Simulationsmodellen gilt es dann, Pinch-Modelle der Prozesse und des Versorgungssystems zu entwickeln. Diese Modelle repräsentieren die Hilfsstoffe in Bezug auf Qualität und Quantität (z.B. Temperatur und Leistung) und stellen die entsprechenden Quellen und Senken grafisch dar.

Die während der Analyse erarbeiteten Modelle und Bilanzen bilden anschließend die Grundlage für die Phase der Synthese, in der dann Verbesserungen systematisch in Angriff genommen und konkrete Maßnahmen zur Umsetzung abgeleitet werden (s. Abb. 5.1).

5.2.2 Die Synthese

Die in der Analysephase entwickelten Pinch-Modelle zeigen die Quellen und Senken von Wärme, Wasser oder Prozessgasen in Bezug auf deren Qualität und Quantität. Für Energie bedeutet dies Temperatur und Wärmeleistung; für Wasser und Prozessgase entspricht dies Reinheitsgrad und Fluss. Die Schwachstellen im System treten dann zu Tage, wenn das theoretisch optimale Integrationsschema mit dem vorhandenen Prozess verglichen wird. (Weitere Einzelheiten sind im Abschnitt 5.3 zu finden.)

Der Zweck der Synthesephase besteht darin, solche Projektideen zu entwickeln, mit deren Hilfe die erkannten Ineffizienzen beseitigt werden können. Wie in der Phase der Analyse sind auch in der Synthesephase Informationen von

Prozessexperten – und bei Bedarf zusätzliche Messungen und Simulationen – erforderlich.

Dieser Input hilft nicht nur, Projekte vollständig zu definieren, sondern kann auch neue Erkenntnisse liefern, die anschließend wieder in die Prozessmodelle aufgenommen werden müssen. Die Lösung hat daher oft einen iterativen Charakter – die Entwicklung von Projektideen führt also zu Änderungen an den Modellen, was wiederum neue Ideen hervorbringt.

Das Endergebnis der Synthesephase ist ein Paket aus kompatiblen und praktischen Verbesserungsmaßnahmen, die Pinch- und Prozessexperten gemeinsam vereinbart haben.

5.3 Der Entscheidungsplan

Einer der größten Vorteile, der sich aus dem strukturierten Konzept der Pinch-Technologie ergibt, ist die Vollständigkeit. Sobald die Analyse abgeschlossen ist, ist sichergestellt, dass alle Ineffizienzen identifiziert sind. Bekannt ist dann auch, welche von ihnen innerhalb der festgelegten wirtschaftlichen Kriterien korrigiert werden können, welche Prozessänderungen vorteilhaft und nützlich sind und welche auf einer allgemeinen Vergleichsbasis formulierten Alternativen die besten sind.

Solange das Problem vollständig definiert werden kann, lässt sich das gesamte Spektrum der Einflüsse in der Lösung berücksichtigen. Die Lösung kann daher in Form eines Entscheidungsplans (auch „Roadmap“ genannt) für die Investitionsstrategie dargestellt werden. Nachstehend ist eine Beispiel-Roadmap für eine petrochemische Anlage abgebildet (Abb. 5.4).

Der Entscheidungsplan zeigt die Prozessprojekte und Versorgungssystemprojekte in Bezug auf die Faktoren:

- Betriebskosteneinsparungen,
- Reduzierung der Emissionen,
- Investitionskosten,
- Kompatibilität mit anderen Projekten.

Alternative Zweige im Entscheidungsplan stellen andere Investitionsstrategien dar, wobei die Kosten und Vorteile der verfügbaren Optionen detailliert aufgeführt werden. Das Beispiel zeigt, dass die Projekte 1 und 2 Projekte mit kurzer Amortisationszeit sind, die unabhängig von der gewählten Strategie implementiert werden können. Ab diesem Punkt gibt es jedoch zwei sehr unterschiedliche Varianten, die hier mit A und B benannt sind (s. Abb. 5.4).

Variante A sieht vor, die Prozessprojekte 3 bis 9 zu implementieren. Alle diese Projekte sind miteinander kompatibel und haben eine Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren. In vielen Fällen, in denen die Investitionsbudgets begrenzt

sind und eine Amortisationsgrenze von zwei Jahren vorgegeben ist, wäre dies die zu wählende Investitionsroute. Variante B zeigt, was durch ein Verschieben dieser Grenzen erreicht werden könnte.

Der Entscheidungsplan zeigt also, was innerhalb der vorgegebenen wirtschaftlichen Kriterien erreicht werden kann und welche Maßnahmen erforderlich wären, um weitere Einsparungen zu erzielen. Für die im Entscheidungsplan dargestellte Variante B besteht die Alternative darin, nicht alle Projekte von 3 bis 9 zu implementieren, sondern nur eine bestimmte Auswahl davon. Projekt 10 stellt eine Alternative zu den Projekten 3 und 8 dar, liegt jedoch außerhalb der normalen Investitionskriterien, die eine Amortisation innerhalb von zwei Jahren vorschreiben. Gleich-

zeitig aber birgt Projekt 10 das Potenzial für wesentlich größere Einsparungen. Sie lassen sich teilweise erzielen, indem der Dampfverbrauch so weit reduziert wird, dass einer der Dampfkessel abgeschaltet werden kann. Steht nun ein Reservekessel zur Verfügung, lässt sich die volle Produktion auch dann aufrechterhalten, wenn ein Kessel zu Wartungszwecken außer Betrieb ist. Die Einsparungen beim Versorgungssystem würden somit durch Einsparungen bei der Produktion ergänzt.

Der obere Zweig zeigt, dass die Implementierung der Projekte 11 und 12 nicht zur Verfügbarkeit eines Reservekessels führen würde. In diesem Fall wird eine neue Dampfturbine installiert, die dann durch Erzeugung von Strom zu Einsparungen führen würde.

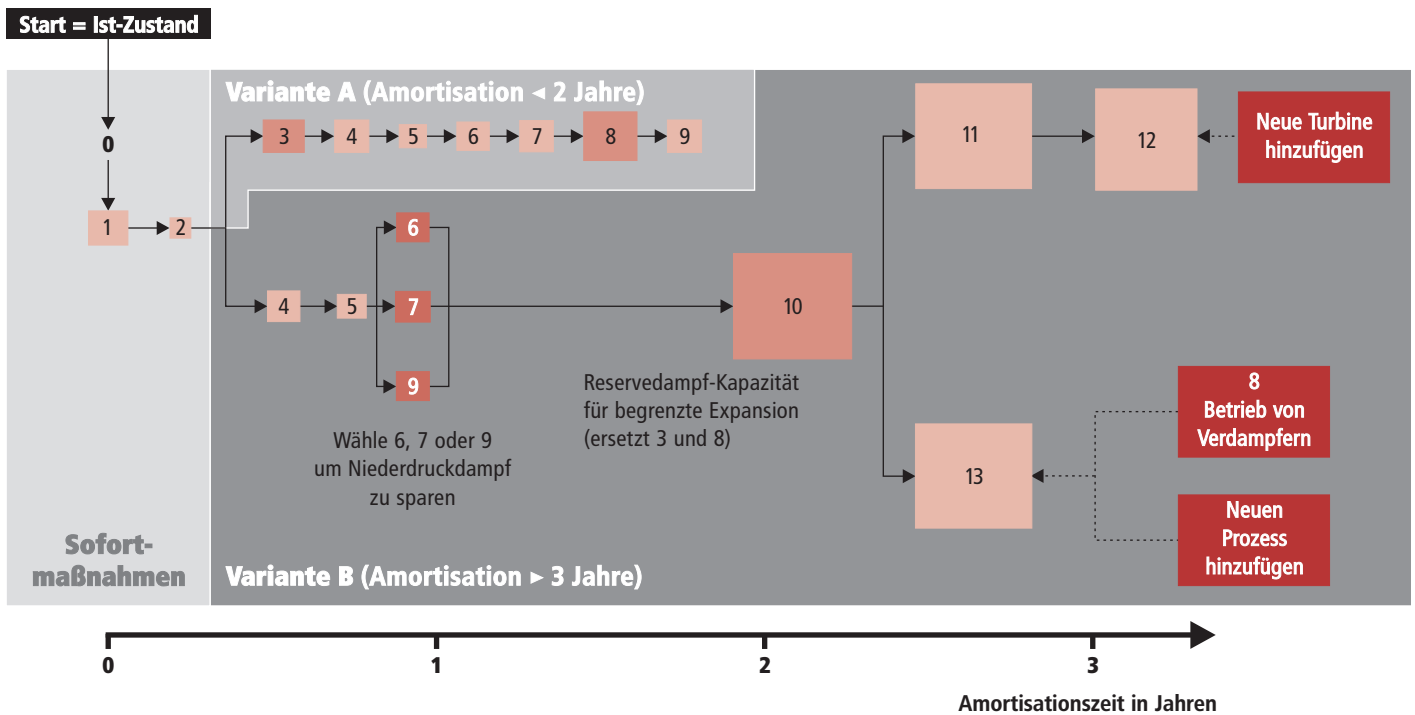


Abb. 5.4: Beispiel für einen Entscheidungsplan mit verschiedenen Varianten (Größe der Kästchen entspricht den prognostizierten Einsparungen)

6 Praxisbeispiele

6.1 Umweltpolitische Schwerpunkte der LfU

In ihrem umweltpolitischen Schwerpunkt „Stoffstrom-Optimierung in kleinen und mittleren Unternehmen“ fördert die Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) Pilotvorhaben zur Einführung eines betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements. Ein betriebliches Energie- und Stoffstrommanagement unterstützt Unternehmen, ihre Produktion effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Die Umweltauswirkungen werden durch eine bessere Ausnutzung der eingesetzten Ressourcen wie Energie und Rohstoffe und durch eine Verminderung der Emissionen und des Abfallaufkommens reduziert. Innovative Prozesse werden angeregt und unterstützt. Durch Kostensenkungen und durch höhere Produktions- und Qualitätssicherheit wird die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen gestärkt. Die Standortsicherheit und die Standortattraktivität Baden-Württembergs werden dadurch weiter erhöht.

Ziele des betrieblichen Energie- und Stoffstrommanagements (ESSM)

- Reduzierung der Auswirkungen von Unternehmen auf die Umwelt bei gleichzeitiger Steigerung der Wirtschaftlichkeit
- Senkung des Ressourcen- und Energieverbrauchs im Unternehmen
- Reduzierung der Emissionen in die Luft und in das Wasser
- Vermeidung bzw. Verminderung von Abfällen
- Anregung innovativer Prozesse, die das Zusammenwirken bestehender Technologien optimieren und die Einführung neuer Technologien fördern
- Erhöhung der Transparenz von Prozessabläufen und deren Kostenstrukturen, damit Entscheidungen auf fundierterer Informationsbasis erfolgen können
- Effektivere Nutzung bestehender Ressourcen und frühzeitige Erkennung zukünftiger Entwicklungen
- In der Summe führt dies zu einer wirtschaftlichen Stärkung des Unternehmens und leistet einen Beitrag zur Standortsicherung. Die ökologische und ökonomische Effizienz des Unternehmens wird wesentlich verbessert.

Das Förderprogramm ist branchenbezogen ausgerichtet, so dass jeweils zwei bis drei Pilotvorhaben pro Branche (u. a. Pharma, Papier-/Kartonherstellung, Druckereien, Lackierbetriebe) durchgeführt werden. Neben dem vorliegenden methodischen Leitfaden werden die Ergebnisse und Erfahrungen der Pilotvorhaben in Form von Branchenleitfäden ausgewertet und Betrieben zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen des umweltpolitischen Schwerpunkts initiierte und förderte die LfU auch vier Pilotvorhaben, bei denen die Pinch-Technologie als Methode des ESSM eingesetzt wurde. In den folgenden Kapiteln werden das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Vorhaben dargestellt. Die Praxisbeispiele veranschaulichen das breite Spektrum der möglichen Anwendungen der Pinch-Technologie. Sie zeigen die besondere Bedeutung auf, die der Modellierung und der Zielfestlegung in solchen Projekten zukommt:

- Modelle erlauben die Simulation verschiedener Betriebsbedingungen und bilden die Grundlage für ein besseres Verständnis der physikalischen und der ökonomischen Wechselwirkungen zwischen Prozessen und Versorgungssystemen.
- Die Zielfestlegung erfolgt auf Basis der optimalen Zielwerte, die über die Pinch-Analyse ermittelt werden. Für diese Zielwerte sind anschließend konkrete Maßnahmen (Projekte) zu entwickeln, die die angestrebten Einsparungen (Energie, Wasser) ermöglichen. Die notwendigen Investitionen sind zu quantifizieren und in einem Entscheidungsplan für die Investitionsstrategie darzustellen.

Nachfolgend werden die Pilotvorhaben in folgenden Unternehmen bzw. Standorten beschrieben:

- Dr. Willmar Schwabe, Karlsruhe – Pharma
- SMURFIT Munksjö Paper GmbH & Co. KG, Unterkochen – Papierherstellung
- Fürstlich Fürstenbergische Brauerei KG, Donaueschingen – Brauerei
- Boehringer Ingelheim, Standort Biberach – Pharma

6.2 Firma Dr. Willmar Schwabe, Karlsruhe

6.2.1 Das Unternehmen

Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel ist ein pharmazeutisches Unternehmen, das seit 1986 Arzneimittel herstellt. Am Standort Karlsruhe-Durlach produziert die Firma Schwabe mit 800 Mitarbeitern vor allem Phytopharmaka und naturverwandte chemisch-definierte Stoffe. Die Herstellung erfolgt vorwiegend im Batchbetrieb und benötigt insbesondere für Extraktionsprozesse Wärme- und Kälteenergie in größerem Umfang.

Für das bei Schwabe durchgeführte Projekt waren die Rahmenbedingungen sehr eng gesteckt. Denn die im Pharmabereich geforderte Good Manufacturing Practice (GMP) erlaubt nur sehr begrenzt, Prozessveränderungen im stofflichen Bereich vorzunehmen.

Daher konzentrierte sich das bei Schwabe durchgeführte Projekt in erster Linie auf den Bereich der betrieblichen Energieversorgung. Um die energiewirtschaftlichen Optionen für das Unternehmen – insbesondere vor dem Hintergrund

des liberalisierten Energiemarkts – zu bewerten, sollte im Rahmen des Projekts eine unbefangene externe Begutachtung stattfinden.

Die durchgeführte Energieeffizienzstudie zielte darauf ab:

1. das Potenzial für die Einsparung von Energie in den Prozessen und im Versorgungssystem zu ermitteln und die Kosten zu quantifizieren – unter Einbeziehung der aktuellen Entwicklungen auf dem Energiemarkt,
2. alle Quellen thermodynamischer Verluste in dem vorhandenen Entwurf und Betrieb des Werks zu identifizieren,
3. Projekte zur Energieeinsparung zu entwerfen und diese in Bezug auf die voraussichtliche Amortisationszeit zu kategorisieren,
4. einen Entscheidungsplan für die Investitionsstrategie zu entwickeln.



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.schwabe.de

6.2.2 Die Ausgangssituation

Die Firma Schwabe ging davon aus, dass es schwierig sein würde, im Unternehmen Einsparmöglichkeiten zu identifizieren, weil die Energieerzeugung und -nutzung am Standort bereits recht effizient erfolgte:

- Eine Gasturbine erzeugt Strom vor Ort.
- Eine Zusatzbefeuerung der Gasturbinenabgase erzeugt Dampf.
- Ein Heißwassersystem sorgt für die Rückgewinnung von Prozesswärme.
- Absorptionskältemaschinen erhöhen die Effizienz der Kälteerzeugung.
- Der Dampfverbrauch ist relativ niedrig.

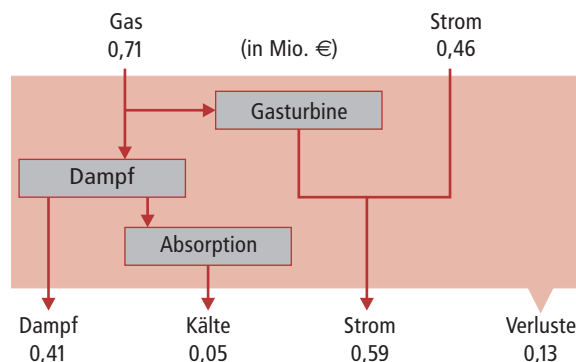


Abb. 6.1: Aufteilung der Energiekosten (Stand: 1999)

Abbildung 6.1 zeigt die Verteilung der Energiekosten des Standorts. Dieses Schema bildete die Grundlage für den Vergleich verschiedener Einsparmöglichkeiten.

Folgende Rahmenbedingungen charakterisieren die betriebliche Energiewirtschaft von Schwabe:

- Energiebedarf (elektrisch 2,6 MW, davon 1,4 MW selbst erzeugt)
- Dampfbedarf (8 bar, 10 t/h, max. 29 t/h)
- Warmwasser
- Kaltwasser
- Kühlwasser
- Entsalztes Wasser
- Flüssiger Stickstoff

Folgende Anlagen und Prozesse kommen dabei zum Einsatz:

- Gasturbine
- Abhitzedampfkessel (Gas)
- Dampfkessel (Heizöl)
- Absorptionskältemaschinen
- Kompressoren
- Entgaser
- Wärmerückgewinnungstauscher
- Wasseraufbereitung
- Gebäudeheizung
- Brauchwasseraufbereitung
- Neutralisationsanlage
- Notstromaggregat (650 KW)

Folgende Verbraucher sind vorhanden:

- Extraktionsbetrieb
- Pharmafertigung
- Technikumsanlagen
- Laboratorien
- Lager, Logistik
- Technik, Werkstätten
- Verwaltung



Abb. 6.2: Heizkessel in der Energiezentrale von Schwabe

6.2.3 Strukturierte Problemlösung

Folgendes strukturiertes Vorgehen wurde gewählt:

1. Vorbesprechung
2. Datenerfassung
3. Auswertung/Analyse
4. Abschlussbesprechung
5. Präsentation der Ergebnisse

Das Projektteam bestand aus vier internen Vertretern (Betriebstechnik, Anlagenplanung, Sicherheit und Umweltschutz sowie gelegentlich Elektrotechnik und technische Leitung) und zwei bis drei externen Beratern. Die Durchführung des Projekts nahm mehr als ein halbes Jahr in Anspruch, die Berater waren vier Tage vor Ort. Der interne Aufwand betrug rund 35 Arbeitstage.

6.2.4 Modellierung

Um vergleichen zu können, wie sich verschiedene Energiesparmaßnahmen auf verschiedene Konfigurationen der Versorgungsanlagen auswirken, wurde mithilfe der Steam97™-Software ein Modell des Dampfsystems entwickelt.

Das Modell lieferte eine exakte Wärme- und Massenbilanz unter Berücksichtigung der thermodynamischen Eigenschaften von Dampf und Wasser. Dies erlaubte es, die Massen- und Energieströme im System zu berechnen. Die Simulation diente dazu, folgende Versorgungssystem-Konfigurationen zu beurteilen:

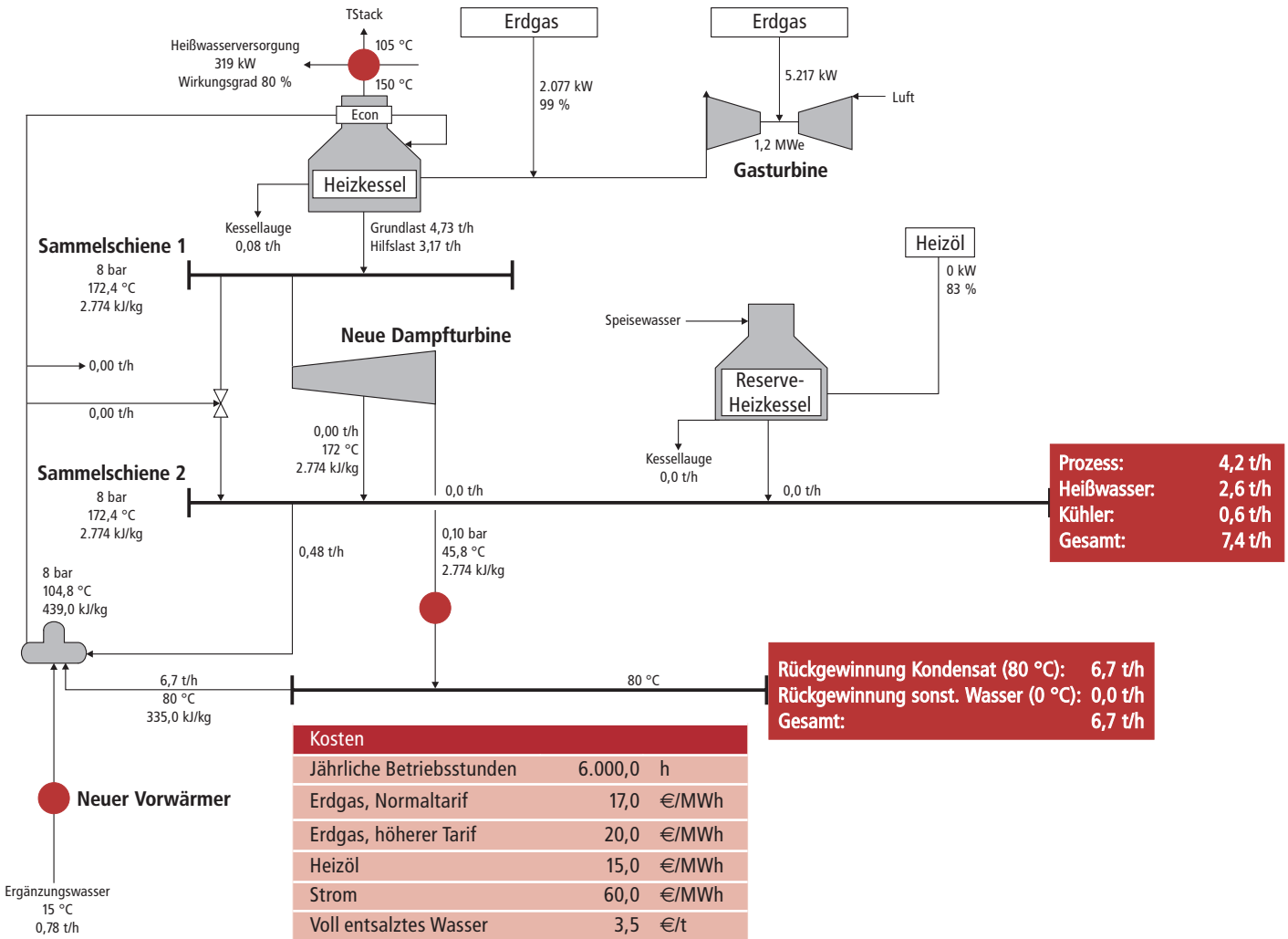
Die Software, die für die Modellierung und Berechnung zum Einsatz kam, wurde nur von dem beteiligten Beratungsunternehmen benutzt. Die Datenerfassung war relativ aufwändig, da Werte in der geforderten Struktur bisher nicht vorlagen.

Dabei zeigte sich aber, dass eine detaillierte Datenerfassung keine zwingende Voraussetzung ist. Stattdessen können plausible Schätzungen ebenso zum Ziel führen und daher zusätzliche Messungen entfallen.

Die Prozessmodellierung führte zu Ergebnissen, die ebenso praxisnah wie verifizierbar waren. Die Umsetzung verlief aus verschiedenen Gründen jedoch in abgewandelter Form. Die Anwendung der Pinch-Methode wird vorerst nicht weiterverfolgt, weil Kapazität und Know-how intern nicht ausreichend verfügbar sind.

- Verwendung eines ölbeheizten Reservekessels
- Modifikation der Gasturbine und des Abhitze-kessels zur Erzeugung von Dampf mit einem höheren Druck als in dem derzeitigen Acht-bar-System
- Installation einer neuen Dampfturbine, mit dem Ziel, den Bedarf an importiertem Strom zu reduzieren
- Einbeziehung und Beurteilung der Auswirkung von zukünftigen Dampfverbrauchern

Abb. 6.3: Modell für eine optimierte Konfiguration des Versorgungssystem (modelliert in Software „Steam97™“)



Die Modellierung der Prozesse und des Versorgungssystem (s. Abb. 6.3) liefert oft erste wertvolle Einblicke in den Prozessbetrieb und somit in das vorhandene Verbesserungspotenzial.

So zeigte sich bei Schwabe bei der ersten Überprüfung der Datenquellen, dass ein Temperaturmessgerät an einer anderen Stelle montiert war

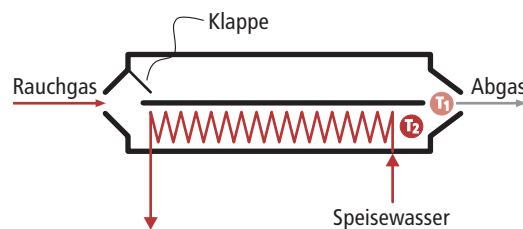


Abb. 6.4: Skizze der geplanten und der tatsächlichen Messstelle

als dokumentiert, was zu fehlerhaften Modellberechnungen führte. Für einen großen Wärmetauscher im Rückgewinnungssystem von Wärme aus Rauchgas wurde die Temperatur T_1 gemessen. Anhand dieses Werts wurde der Bypass-Durchfluss des Rauchgases gesteuert, um so eine Mindest-Schornsteintemperatur sicherzustellen. Konsistenzprüfungen mit dem erstellten Modell ergaben, dass die Temperaturmessung in Wirklichkeit bei T_2 erfolgte (s. Abb. 6.4).

Aufgrund der Datenerhebung an der falschen Messstelle suggerierten die Werte, dass die Wärmerückgewinnung bereits im Optimum sei, obwohl noch Potenzial für Verbesserungen vorhanden war. Die Daten wurden korrigiert und in die Zielsetzung aufgenommen, was zur Entwicklung eines interessanten Projekts führte (s. Abschnitt „Zielfestlegung“).

6.2.5 Zielfestlegung

Für die einzelnen Prozesse und den Standort als Ganzes entwickelte das Projektteam im Anschluss an die Modellierung mehrere Energie-Pinch-Modelle. Diese dienten dazu, Ineffizienzen bei der Energienutzung aufzudecken (s. Abb. 6.5).

Diese Standortprofile enthielten bereits die oben erwähnten korrigierten Rauchgasdaten. Die Kurven zeigten, dass die Wärmerückgewinnung aus dem Kesselrauchgas zur Herstellung von Heißwasser gesteigert werden konnte. Dadurch schien es möglich, den Dampfbedarf des Standorts insgesamt zu senken.

Projektvorschläge

Das hierzu konzipierte Projekt versprach bei einer Investition in Höhe von 22.000 Euro eine Ersparnis von 24.500 Euro pro Jahr – Voraussetzung: eine entsprechend optimierte Steuerung.

Wäre die neue Konfiguration bereits von Anfang an im Prozessdesign berücksichtigt worden, hätte dies die Investitionskosten sogar um ungefähr 150.000 Euro gesenkt (s. Abb. 6.6).

Aufbauend auf den Ergebnissen der Pinch-Analyse beschloss die Firma Schwabe, die Wärmerückgewinnung aus dem Kesselrauchgas zu steigern und für die Herstellung von Heißwasser zu nutzen. Aus Gründen der Betriebssicherheit hielt sich das Unternehmen allerdings die Möglichkeit offen, bei Störfällen die alte Variante zu fahren.

Im Kaltwasserkreislauf waren bereits Änderungen der vorhandenen Konfiguration geplant. So sollte beispielsweise ein im Kältekreislauf zusätzlich installierter Puffertank den Betrieb der Absorptionskältemaschinen weiter verbessern. Die Pinch-Analyse modellierte den geplanten Entwurf und ermittelte weitere Optimierungspotenziale.

Der geplante Entwurf sah vor, die Verbraucher effektiv von den Kältemaschinen abzukoppeln, wobei ein Puffertank die Betriebsfähigkeit verbessern sollte. Der Durchmischungseffekt im Tank hätte jedoch bedeutet, dass die Kühlung suboptimal erfolgt wäre, was möglicherweise

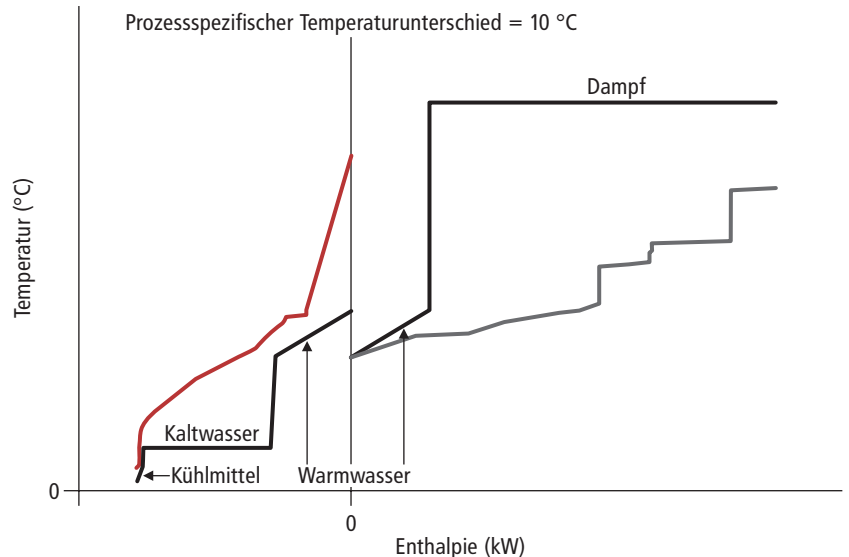


Abb. 6.5: Composite-Kurve für den gesamten Standort

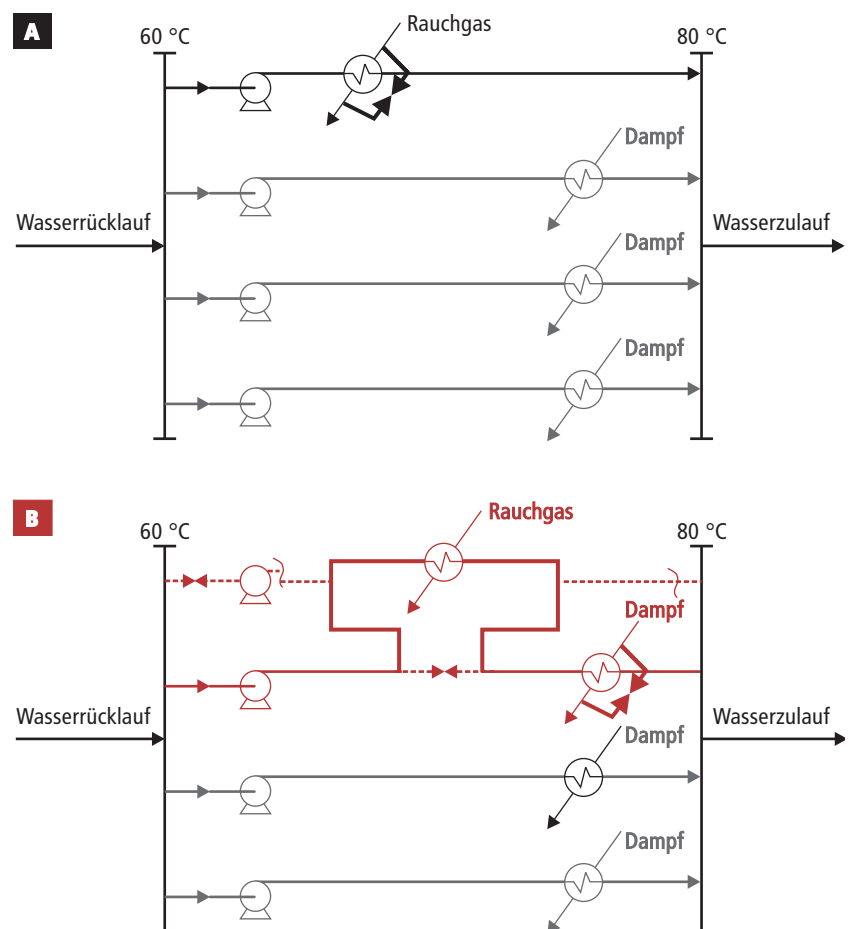


Abb. 6.6: Vorhandene Konfiguration (A) und vorgeschlagene Konfiguration (B)

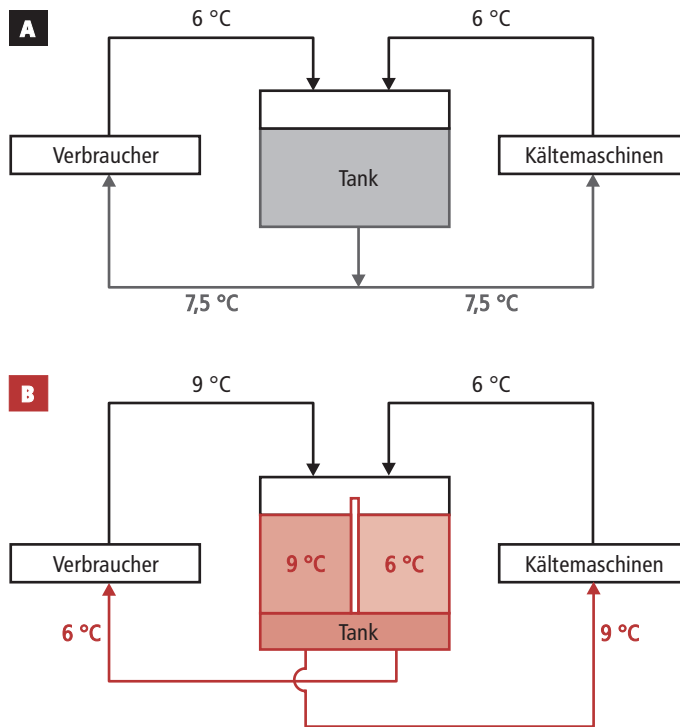


Abb. 6.7: Geplante Konfiguration (A); alternative Konfiguration (B) nach Analyse

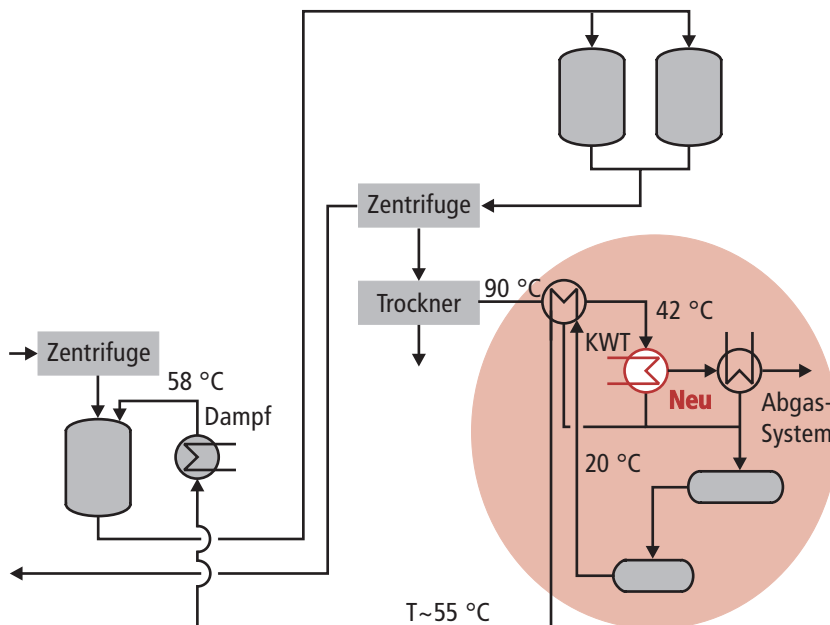


Abb. 6.8: Vorgeschlagene Änderungen für den Kühlwasserkreislauf

zusätzliche Wärmetauscherfläche erfordert hätte, um die nötige Prozesskühlung zu erreichen (s. Abb. 6.7).

Die vorgeschlagene Modifikation bestand darin, ein senkrechttes Leitblech in den Puffertank einzubauen. Die Kältemaschine würde dann kaltes Wasser auf der einen Seite des Leitblechs zuführen, mit dem die Prozesse gespeist werden könnten. Das wärmere Wasser aus den Prozessen würde auf der anderen Seite des Leitblechs zurückgeführt und erneut in die Kältemaschine geleitet werden.

Mittels eines einfachen Bypasses konnte im Anschluss sogar eine noch einfachere Variante gefunden werden. Sie wurde mit sehr geringen Investitionen realisiert und verspricht bei einer erwarteten Amortisationszeit von weniger als einem Jahr Einsparungen von 3.000 Euro pro Jahr.

Ein dritter Projektvorschlag ließ sich mithilfe der Analyse der Prozess-Summenkurven (Composite-Kurven) identifizieren. Bis dahin wurden die Abdämpfe aus einem Produkttrockner zunächst in einem Kühlwasserkondensator (24–34 °C) und dann in einem Kaltwasserkondensator (6–12 °C) abgekühlt. Das kondensierte Lösungsmittel gelangte wieder in den Prozess, nachdem es mit Dampf von 20 °C auf 58 °C erwärmt worden war.

Der in Abbildung 6.8 dargestellte Änderungsvorschlag sieht vor, den vorhandenen Kühlwassertauscher zu nutzen, um Wärme zwischen der recycelten Flüssigkeit und den Abdämpfen auszutauschen. Zwischen den beiden vorhandenen Kondensatoren würde ein neuer Kühlwassertauscher zum Einsatz kommen.

Dadurch ließe sich die Kaltwasserleistung auf ihrem bestehenden Niveau halten, der Dampfbedarf nähme jedoch um 30 Kilowatt ab. Die geschätzten Investitionen für den neuen Tauscher hätten zu einer Amortisationszeit von vier Jahren geführt. Dies und der Platzmangel machen die Umsetzung des Projekts derzeit unmöglich. In Verbindung mit künftigen Erweiterungen könnten die Investitionen dennoch sinnvoll sein.

6.2.6 Ergebnisse

Das Einsparpotenzial für Energie lag im Prozess- und Versorgungssystem insgesamt bei rund 310.000 Euro pro Jahr, was 20 Prozent der bestehenden Energiekosten ausmachte. Von den für dieses Ziel entwickelten Projekten besaß etwa die Hälfte eine Amortisationszeit von weniger als zwei Jahren (s. Abb. 6.9).

Die übrigen Projekte hatten eine längere Amortisationszeit und können daher als „Gelegenheitsprojekte“ betrachtet werden – was bedeutet, dass ihre Umsetzung zwar unter den gegebenen Bedingungen wirtschaftlich nicht lohnenswert ist, im Zuge eines Neuentwurfs oder einer Expansion aber interessant werden kann.

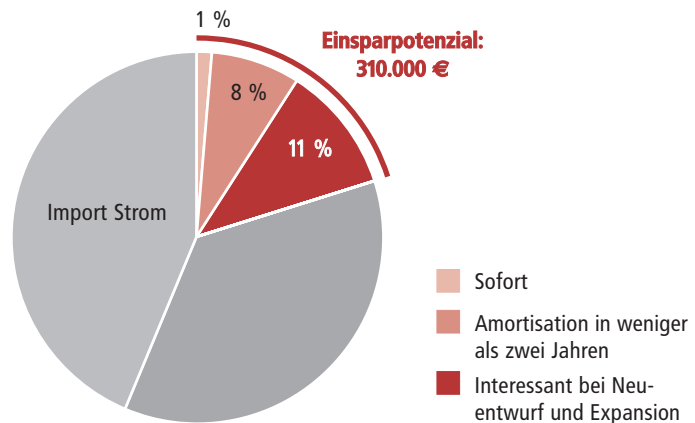


Abb. 6.9: Amortisationsbetrachtung der konzipierten Projekte

6.2.7 Fazit

Für die Firma Schwabe war die Studie nach eigenen Angaben insgesamt aufschlussreich. Weil aber intern Kapazitäten und Know-how fehlen, verfolgt das Unternehmen die Pinch-Technologie derzeit nicht weiter. Im Vergleich mit anderen Methoden bewertete das Unternehmen die Pinch-Technologie zwar als anspruchsvoll – dank ihrer Roadmap aber als sehr hilfreich für Entscheider.

Rückblickend hob die Firma Schwabe, die bis zum Zeitpunkt der Studie überzeugt davon war, alles im Griff zu haben, besonders hervor, dass sich mit der Pinch-Technologie wider Erwarten einige bedeutende Verbesserungspotenziale identifizieren ließen. Aufgrund der hohen produktbezogenen Anforderungen und der vorhandenen technischen bzw. räumlichen Einschränkungen ließ sich leider nur ein Teil der Vorschläge in die Praxis umsetzen.

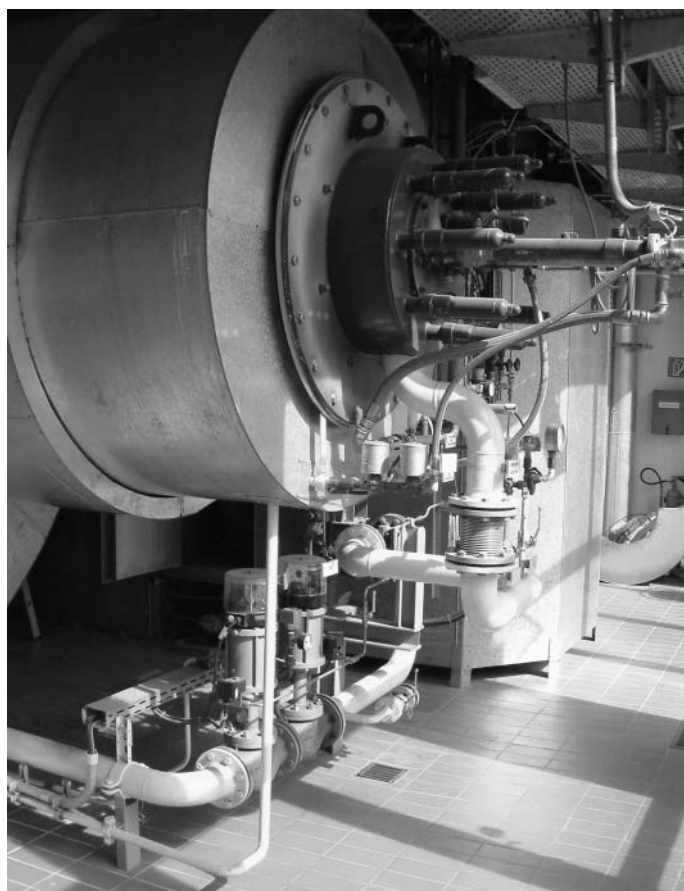


Abb. 6.10: Heizanlage der Fa. Schwabe



6.3 SMURFIT Munksjö Paper GmbH & Co. KG, Unterkochen

6.3.1 Das Unternehmen

Die SMURFIT Munksjö Paper (S.M.P.) ist seit 1613 in Unterkochen angesiedelt. Heute produziert das Unternehmen dort mit rund 300 Mitarbeitern etwa 70.000 Tonnen Dekorpapier im Jahr.

Die Papierproduktion ist gekennzeichnet durch einen hohen spezifischen Energiebedarf, einen hohen Wasserverbrauch und entsprechenden Abwasseranfall. Demzufolge steht die Firma

unter stetigem Druck, ihre Umweltauswirkungen zu reduzieren. Galten früher Investitionen vor allem dem Kapazitätsausbau, liegt heute der Fokus auf Maßnahmen zur Effizienzsteigerung – denn sie sind Voraussetzung dafür, die umweltrechtlichen Anforderungen zu erfüllen. Sie sind darüber hinaus ein Mittel, langfristige wirtschaftliche Vorteile von Energieeinspar- und Umweltschutzinvestitionen zu realisieren.

6.3.2 Die Ausgangssituation

SMURFIT Munksjö Paper produziert auf drei großen Papiermaschinen (s. Abb. 6.11) im Fünfschichtbetrieb an 350 Tagen im Jahr. Die Energieversorgung basiert auf einem kohlebeheizten Kessel mit 40 Tonnen Dampf pro Stunde, an den zur Stromerzeugung eine Dampfturbine mit sieben Megawatt Leistung angeschlossen ist.

Ein wichtige Aufgabe der Energiezentrale besteht darin, die Temperatur des Abwassers unter den genehmigten Wert von 30° C zu senken, bevor es in den Vorfluter, den Fluss Kocher, gelangt. Als schwierig erweist sich dies vor allem in den Sommermonaten und bei niedriger Wasserführung. Produktionsunterbrechungen führen teilweise zu hohen Dampfüberschüssen, weshalb in solchen Fällen Dampf wieder kondensiert wird.

Diese Kondensation kann dazu führen, dass die Temperatur des Abwassers aus der Kläranlage den Grenzwert von 30 °C erreicht und gegebenenfalls überschreitet. Um dies zu vermeiden, kann der überschüssige Dampf – natürlich mit hohem Energieverlust – über das Dach abgeblasen werden.

Um einen besseren Überblick über die Gesamtsituation in diesen Fällen zu bekommen, beschloss das Unternehmen, eine Pinch-Analyse durchzuführen. Ziel hierbei war, bessere Vorhersagen darüber zu bekommen, wie und wie schnell sich die verschiedenen Betriebsbedingungen auf die Abwassertemperatur auswirken. Dazu sollten die Prozesse analysiert und modelliert werden. Eine weitere Betrachtung galt dem Aspekt der Kosteneinsparmöglichkeiten.

6.3.3 Strukturierte Problemlösung

Das Projektteam bestand im Wesentlichen aus dem Leiter der Energieversorgung der Firma S.M.P. und zwei externen Beratern. Die Projektlaufzeit betrug etwa ein halbes Jahr.

Die Vorgehensweise umfasste:

- eine Bestandsaufnahme vor Ort,
- die Erstellung eines Grobkonzepts,
- die (thermodynamische) Modellierung in der Pinch-Software STEAM97™,

- eine Kostenbetrachtung mit Berücksichtigung von Betriebs- und Investitionskosten.

Im Zentrum der Studie stand ein Wärme-Pinch, wobei – bedingt durch die besonderen Rahmenbedingungen – mehr eine allgemeine Betrachtung der Möglichkeiten zur Pinch-Technologie vorgenommen wurde. Um die notwendigen Daten für die Analyse zu bekommen, waren zusätzliche Messungen erforderlich.

Darauf aufbauend planten die Projektpartner eine Szenarioanalyse des Wassermanagements innerhalb der gegebenen Rahmenbedingungen und eine Simulation der Outputgrößen.

Die Studie sah unter anderem vor, mithilfe einer Software das Monitoring der Betriebszustände zu verbessern, um beispielsweise die zu erwartende Abwassertemperatur frühzeitig aus den Betriebsparametern abzuleiten zu können.

Die Ziele der Energiestudie lauteten:

- Entwickeln einer kostengünstigen Lösung, um die Abwassertemperatur zu senken, bevor es in einen angrenzenden Fluss geleitet wird,
- Berücksichtigung komplexer Betriebsbedingungen,
- Quantifizieren des Potenzials, das für eine mögliche Senkung der Energiekosten besteht.

Die Wechselwirkungen zwischen dem Flusswasser- und dem Versorgungssystem sind komplex. Das Versorgungssystem des Standorts liefert Strom, Wärme (durch Dampf) und Wasser für die Prozesse. In der bestehenden Konfiguration entspricht der Wasserbedarf des Werks je nach Jahreszeit der überwiegenden Wassermenge des Flusses Kocher. Das Wasser, das oberhalb des Standorts aus dem Kocher entnommen wird, dient als:

- Kühlwasser,
- Prozesswasser,
- Zusatzwasser für das Dampfsystem.

Das Abwasser gelangt in die werkseigene Abwasserreinigungsanlage und von dort zurück in den Fluss. Die genehmigte Abwassertemperatur beträgt 30 °C. Dies erzwingt in wärmeren Monaten eine Änderung beim Betrieb des Versorgungssystems, was sich bisher als energetisch ineffizient erwiesen hatte.

Um die Temperatur des Vorfluters um 3 °C bis 5 °C zu senken, zog die S.M.P. in Betracht, in neue Kühltürme zu investieren. Weitere Alternativen wurden jedoch gesucht. Und dabei war eine systematische Herangehensweise, wie sie die Pinch-Technologie ermöglicht, zwingend erforderlich, um alle Alternativen, die sich bei diesen komplexen Rahmenbedingungen ergaben, vergleichend zu bewerten.

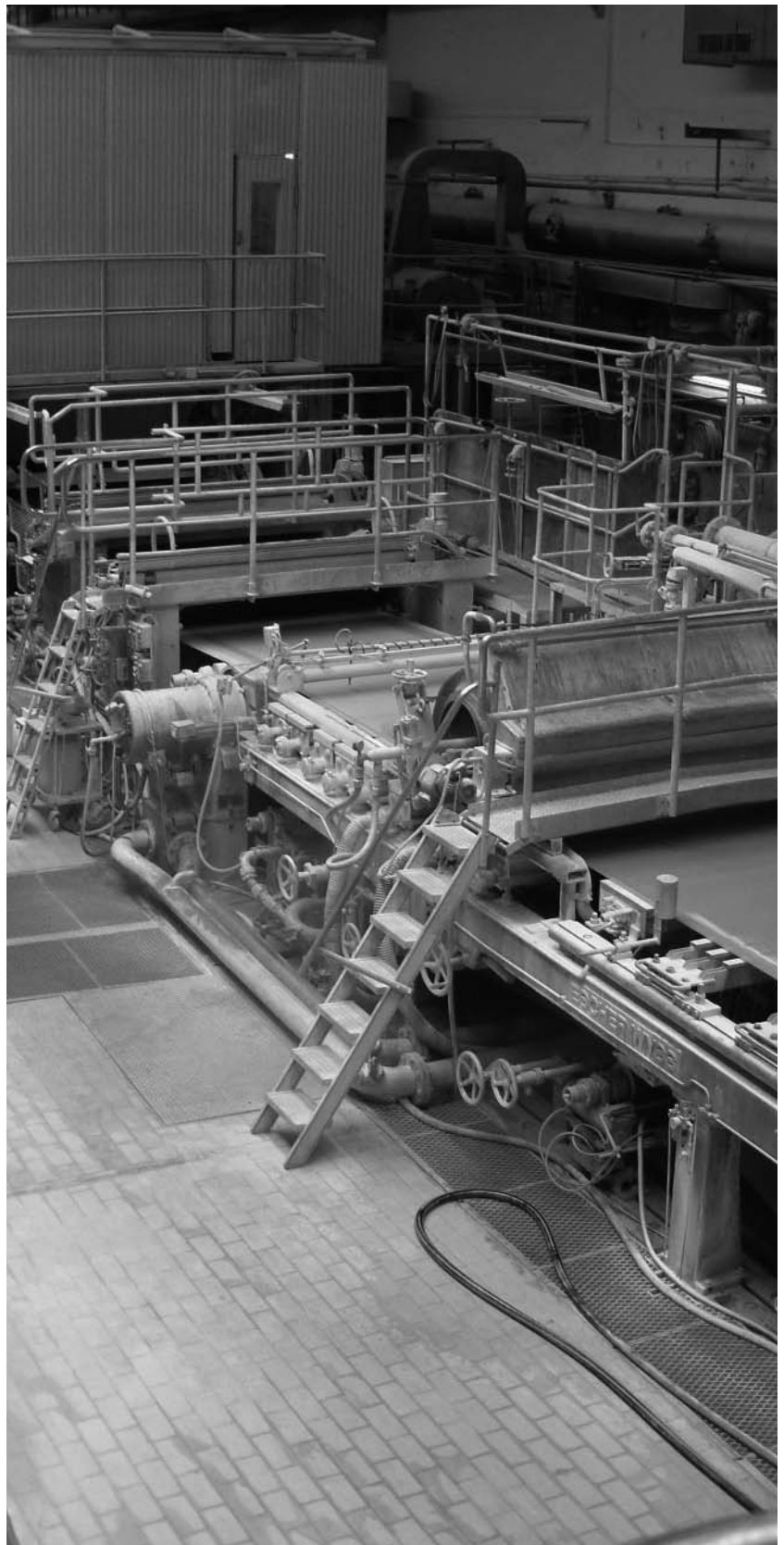


Abb. 6.11: Papiermaschine der Firma SMURFIT Munksjö Paper

6.3.4 Modellierung

Um die Wechselwirkungen zwischen dem Dampf-, Strom- und Wassersystem übersichtlich darstellen zu können, entwickelte das Projekt-Team mithilfe der Steam97™-Software ein Modell des derzeitigen Versorgungssystems (Abb. 6.12).

Das Modell liefert eine Übersicht über alle Auswirkungen, die Änderungen der Standortbilanz für Stromerzeugung, Wärmebedarf und Wasser nach sich ziehen, die die Gesamtbetriebskosten des Versorgungssystems der S.M.P. beeinflussen.

Bis zum Zeitpunkt der Studie bestand die Betriebsstrategie darin, die Stromerzeugung durch die Dampfturbine zu maximieren, um die externen Stromkosten zu minimieren. Dabei wurde der Überschussdampf in einem wassergekühlten Hilfs-Kondensator abgekühlt und wieder kondensiert, was direkten Einfluss auf die Temperatur des verwendeten Betriebswassers hatte: Je höher die Leistung im Kondensator war, desto

höher war die Temperatur des Betriebs- und damit des eingeleiteten Abwassers.

Mithilfe des neuen Modells sollte beurteilt werden, welche Folgen alle potenziellen Veränderungen des Versorgungssystems hätten – Änderungen wie :

- Ein- oder Ausschalten des Kondensators
- Installation einer Kondensationsturbine zur Nutzung des Überschussdampfs der Stromerzeugung
- Integration zukünftiger Dampfverbraucher

Diese unterschiedlichen Szenarien wurden im Rahmen des systematischen Konzepts für die Analyse von Versorgungssystemen entwickelt. Weitere Vorschläge für Energieeinsparungen ergaben sich aus der Bestimmung der Optimalwerte in der Zielfestlegung.

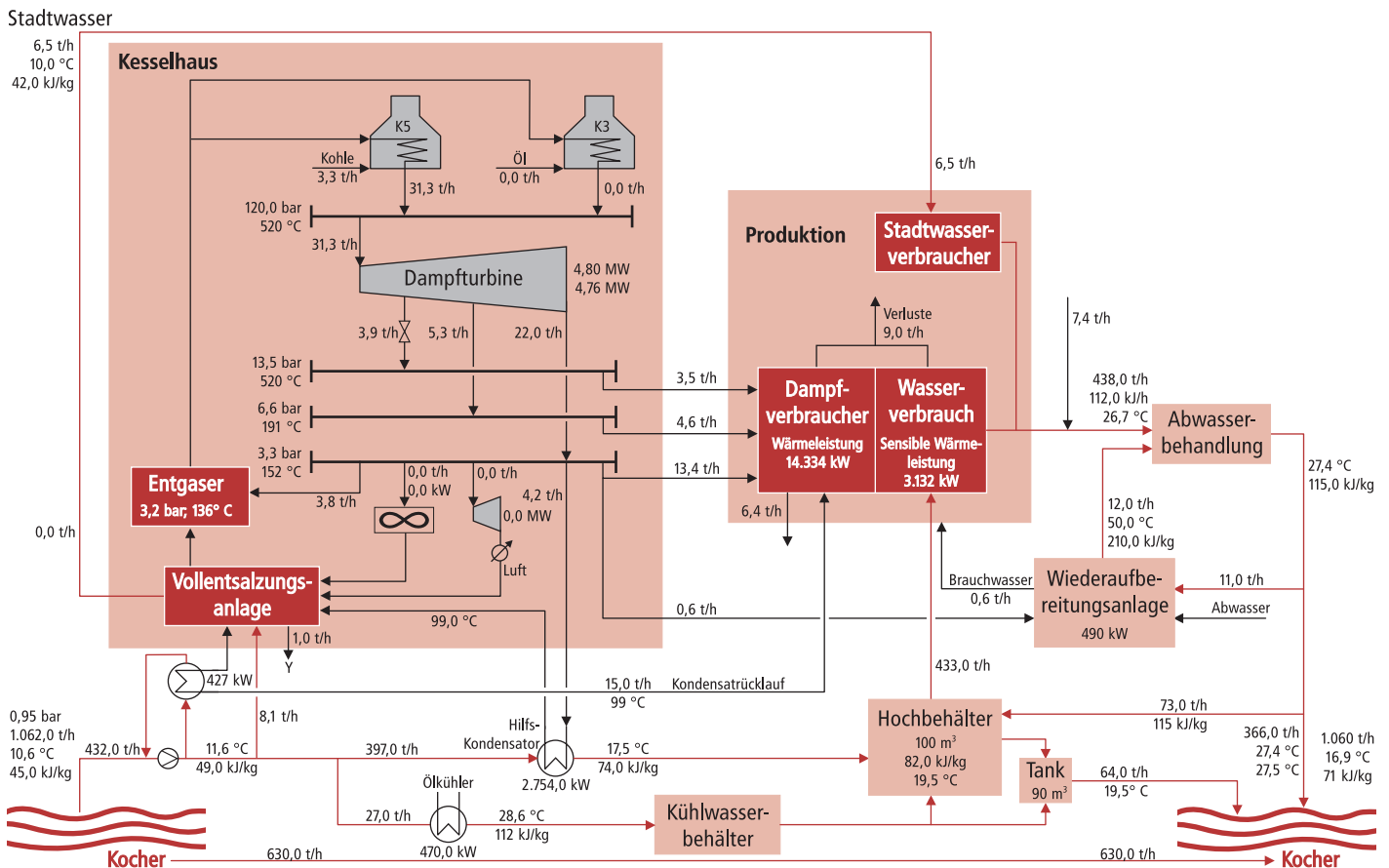


Abb. 6.12: Modell des Versorgungssystems von SMURFIT Munksjö Paper

6.3.5 Zielfestlegung

Die Zielfestlegung erfolgte in zwei Abschnitten:

- Sensitivitätsanalyse mit dem Ziel zu beurteilen, wie sich die Temperaturverläufe für das Betriebs- bzw. Abwasser unter Berücksichtigung verschiedener Betriebszustände verändern.
- Traditionelle Ermittlung von Energiezielen, in der Absicht den Heiz- und Kühlbedarf der Prozesse mit der Stromerzeugung und den Investitionsausgaben abzugleichen.

Eine verbesserte Wärmerückgewinnung würde gleichzeitig den Heiz- und Kühlbedarf senken, was in diesem Fall den zusätzlichen Vorteil hätte, dass die Temperatur des Abwassers sänke.

Die Sensitivitätsanalyse ergab, dass geänderte Stromtarife die wichtigste Rolle spielen – sowohl für die Minimierung der zukünftigen Betriebskosten als auch für die Senkung der Temperatur des Abwassers.

Die bestehende Betriebsstrategie basierte darauf, dass Strom billiger eigenerzeugt als eingekauft werden konnte. Aufgrund neuer Stromtarife, die im Jahr 1999 eingeführt wurden, ergab sich die Frage, ob es nicht wirtschaftlicher sei, Fremdstrom zu beziehen, als Strom mit der firmeneigenen Dampfturbine zu erzeugen.

Die neue Strategie (s. Abb. 6.13) bedeutete, dass die S.M.P. den Kühlwasserkondensator nur noch in geringem Umfang nutzen sollte. Würde der Einsatz des Kondensators minimiert – bei gleichbleibendem Verbrauch an Flusswasser – ließen sich die Betriebskosten um 120.000 Euro pro Jahr senken. Darüber hinaus nähme die Temperatur des Betriebs- und damit des eingeleiteten Abwassers ab – im Sommer um errechnete 5,4 °C und im Winter um 9,7 °C.

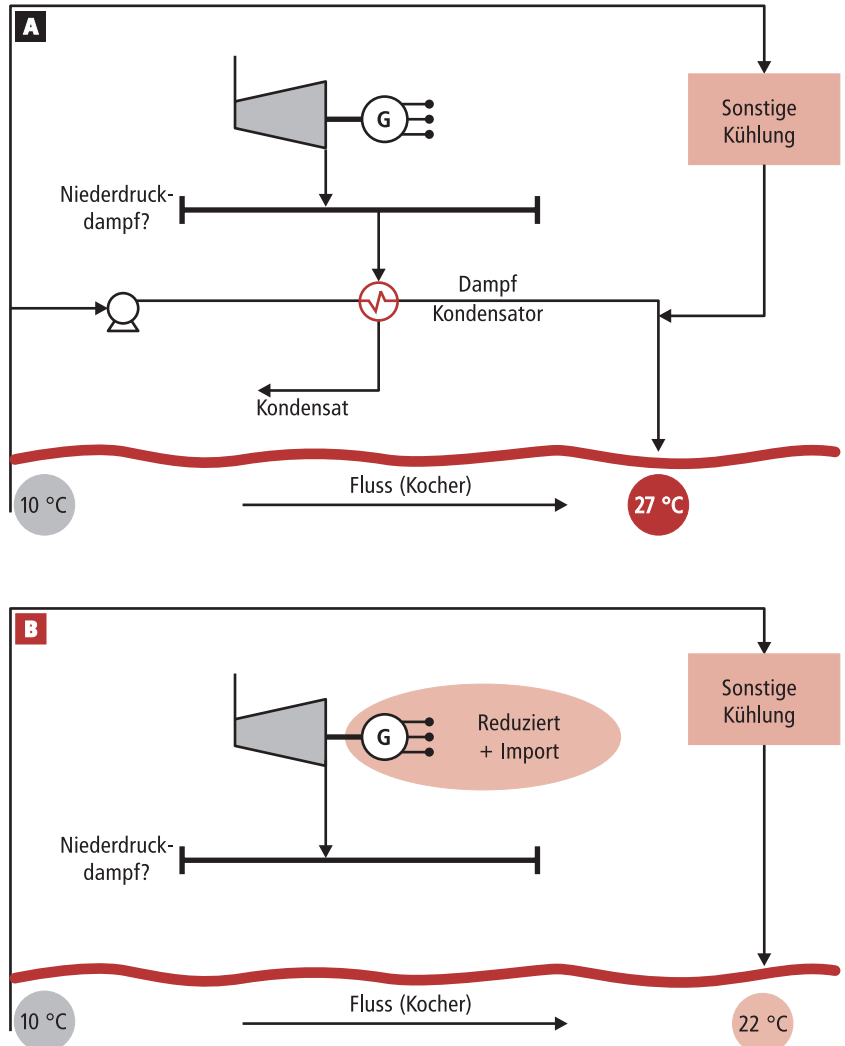


Abb. 6.13: Vorhandene Konfiguration (A) und alternative Konfiguration (B)

Zwar hatte die Deregulierung der Strommärkte deutlich geringere Stromtarife zur Folge. Die Analyse zeigte aber, dass für die S.M.P. die Eigenzeugung immer noch günstiger war. Aus diesem Grund wurde die beschriebene Maßnahme nicht realisiert.

Ein weiteres, wenn auch kleineres Optimierungspotenzial ergab sich aus dem Szenario, in dem die Wärme des Kondensats rückgeführt und zum Vorheizen des Speisewassers verwendet werden würde (s. Abb. 6.14).

Bisher wurde das aus den Prozessen zurückgeleitete Kondensat mit Flusswasser gekühlt, um die technischen Anforderungen für die Kondensatpumpe einzuhalten. Durch Verwendung eines Wärmetauschers ließe sich die thermische Belastung des Betriebswassers reduzieren und die Abwassertemperatur um $0,7\text{ °C}$ senken. Die Vorwärmung des Speisewassers mit Kondensat, das im Entgaser mit 3,2-bar-Dampf erwärmt wird, ließe den Bedarf an Niederdruckdampf sinken.

Mit der verminderten Dampferzeugung wäre allerdings die werkseigene Stromerzeugung nur noch in geringem Umfang möglich gewesen. Bei den zum Zeitpunkt der Studie geltenden Stromtarifen hätte dies bedeutet, dass die Betriebskos-

ten gestiegen wären. Seitdem allerdings hat sich ein Wandel bei den Tarifen vollzogen – heute würde die Maßnahme 15.000 Euro pro Jahr sparen und gleichzeitig die Temperatur des Abwassers um durchschnittlich $0,7\text{ °C}$ senken. Die Amortisationszeit für das Projekt wurde für den gewählten Entwurf des Wärmetauschers auf zwei bis drei Jahre geschätzt.

Neben den bisher beschriebenen Ergebnissen förderte das Projekt weitere Verbesserungsvorschläge zu Tage, die in der Lage wären, die allgemeinen Betriebskosten zu senken – durch Maßnahmen wie:

- Vorheizen des Kesselspeisewassers (Ersparnis von 33.000 Euro pro Jahr)
- Umstellen von 14-bar-Dampf-Verbrauchern auf Sechs-bar-Dampf (Ersparnis von 24.000 Euro pro Jahr)

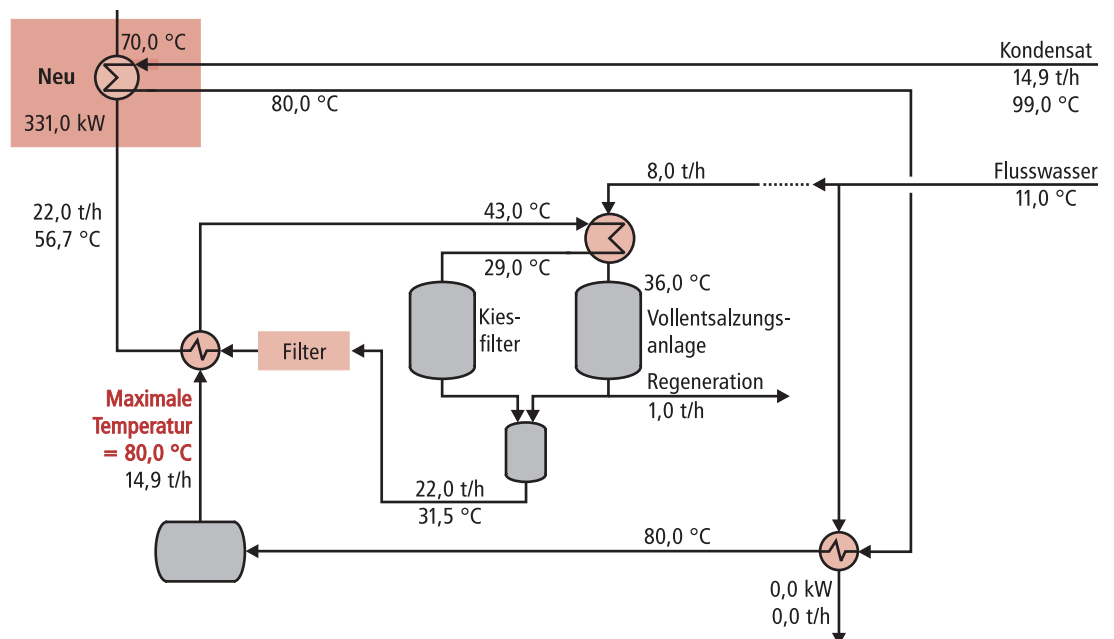


Abb. 6.14: Vorschlag zur zusätzlichen Reduzierung der Einleitertemperatur

6.3.6 Ergebnisse

Insgesamt beliefen sich die in der Studie identifizierten Möglichkeiten zur Energieeinsparung für die idealisierten Betriebszustände auf 230.000 Euro pro Jahr, was vier Prozent der bestehenden Versorgungskosten entsprach. Bei der Analyse wurde eine Betriebsstrategie

ersichtlich, die es erlaubte, die Temperatur des eingeleiteten Abwassers zu senken und gleichzeitig die Betriebskosten zu reduzieren. Durch diese Strategie erübrigte sich die Investition in Kühltürme – eine Maßnahme, die die S.M.P. im Vorfeld der Studie in Erwägung gezogen hatte.

6.3.7 Fazit

Eines der wichtigsten Ergebnisse für die Firma Munksjö war nach eigenen Angaben die Modellierung der Wechselwirkungen zwischen dem Versorgungssystem und der zu erwartenden Temperatur des eingeleiteten Abwassers – denn das Modell eignet sich als Grundlage für das Energiemanagement-System des Unternehmens.

Zu Beginn der Studie galt als Ziel der Modellierung und der Analyse des Prozessdesigns eigentlich, ein Instrument zu entwickeln, das erlaubt, die Einhaltung von Genehmigungs- und Überwachungsaufgaben zu beobachten und zu verfolgen. Während der Studie verschob sich der Fokus allerdings stark in Richtung einer Betriebskostenanalyse.

Durch die fehlende Möglichkeit, schnelle und ungeplante Veränderungen in den Betriebsbedingungen nachzuvollziehen, waren die Ergebnisse der Pinch-Analyse insgesamt nur eingeschränkt anwendbar.

Erst in einem zweiten Teilprojekt der Studie gelang es, die ursprüngliche Zielsetzung direkt in Angriff zu nehmen und dafür eine spezielle Software zu entwickeln. Den damit verbundenen Aufwand scheinen die Ergebnisse derzeit allerdings noch nicht zu rechtfertigen. Dies liegt nach Einschätzung der Firma S.M.P. zum Teil am verwendeten Modell, zum Teil an prinzipiellen Problemen – wie beispielsweise den stark variierenden Betriebsbedingungen.

Die Methodik erfordert eine umfassende Modellierung der Anlagen und ist daher relativ zeitaufwendig, was eine gewisse Hemmschwelle darstellen kann.

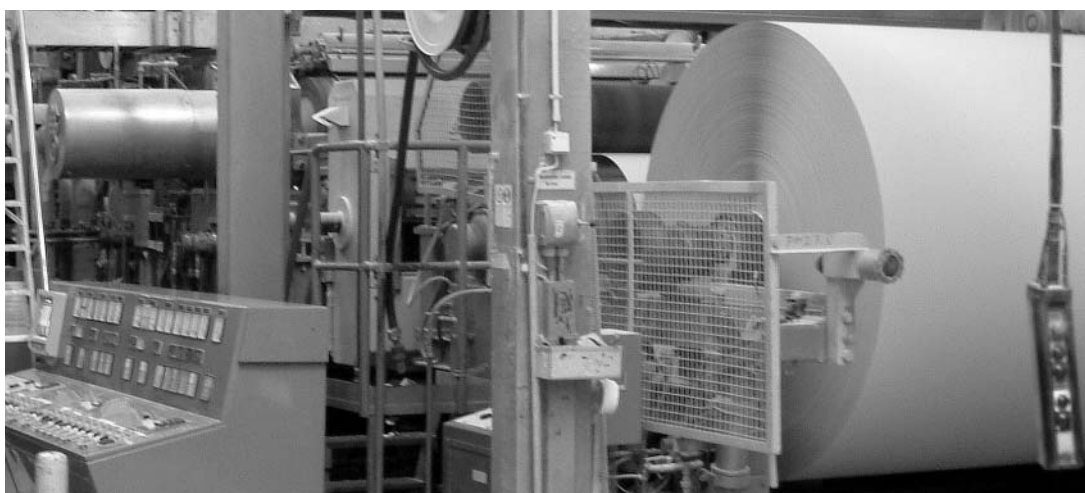


Abb. 6.15: Endprodukt „Papiertrolle“



6.4 Fürstlich Fürstenbergische Brauerei KG, Donaueschingen

6.4.1 Das Unternehmen

Die Fürstlich Fürstenbergische Brauerei KG braut seit 1705 Bier in Donaueschingen. Mit rund 300 Mitarbeitern erzeugt das Traditionsunternehmen heute für den nationalen und internationalen

Markt zahlreiche Biersorten, die vor Ort in Flaschen, Kästen, Dosen und Fässer abgefüllt werden. Fürstenberg besitzt seit 1995 ein Umweltmanagementsystem nach EMAS und ISO 14001.

6.4.2 Die Ausgangssituation

Die Brauerei benötigt Energie zum Brauen und Wasser für die Produktherstellung sowie – in besonders großen Mengen – für das Reinigen und Spülen der Anlagen. Fürstenberg besitzt zur Wassergewinnung eigene Brauchwasserbrunnen und ist der größte Abwassereinleiter in Donaueschingen. Das Brauen erfolgt im Chargenprozess, was zu diskontinuierlichen Mengenströmen führt. Das Abwasser wird über ein weit verzweigtes Kanalsystem gesammelt und enthält vor allem biologisch leicht abbaubare Inhaltsstoffe.

verwenden. Auch die räumliche Situation der historisch gewachsenen Brauerei in beengter, zentraler Lage ließ technische Maßnahmen nur bedingt zu.

Ein weiteres Limit für die Wassereinsparung ergab sich durch die kommunalen Grenzwerte für die Abwasserverschmutzung. Der Grenzwert erlaubt eine maximale Schadstoffkonzentration im Abwasser. Da die Schadstofffracht bei gleichbleibender Produktionsmenge konstant ist, steigt bei einer Abwasserreduzierung – z.B. durch Wiederverwendung – die Schadstoffkonzentration im Abwasser. Überschreitet diese jedoch die derzeit zulässigen Grenzwerte, berechnen die Kommunen einen zusätzlichen Starkverschmutzerzuschlag. Die kommunale Abwassersatzung der Stadt Donaueschingen sollte im Jahr 2002 neu formuliert werden, was in der Studie zu berücksichtigen war.

Die Wasser- und Abwassersituation (s. Abb. 6.16) des Unternehmens ist gut dokumentiert in Form der Umweltbilanzen und mehrerer Diplomarbeiten. Weil die Brauerei darüber hinaus bereits zwei Studien zur Abwasserminimierung durchgeführt hatte, ging Fürstenberg im Vorfeld der Studie davon aus, dass der Spielraum für weitere Verbesserungen eng sein würde.

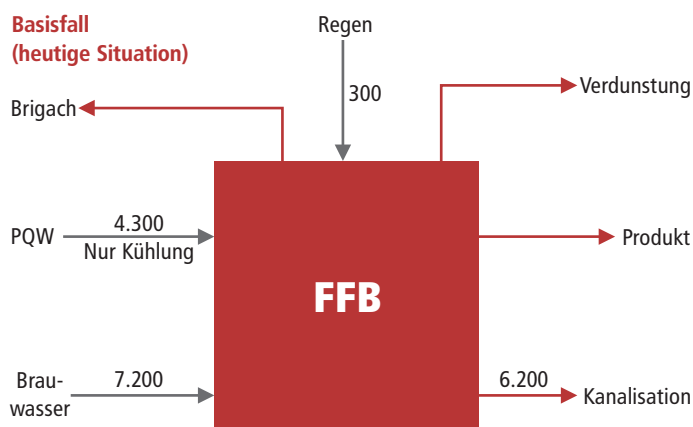


Abb. 6.16: Schematische Wasserbilanz von Fürstenberg

Grenzen setzten darüber hinaus die hohen Anforderungen an die Produktqualität und die gesetzlichen Auflagen für die gesamte Lebensmittel- und Getränkeindustrie, die nur wenig Möglichkeiten einräumen, Wasser wiederzu

Die Wasser-Pinch-Studie, die Fürstenberg im Jahr 2000 durchführte, verfolgte daher zwei Ziele:

1. Senken der Betriebskosten der Brauerei durch Minimieren des Frischwasserverbrauchs und des Abwasseranfalls unter Beibehaltung der Abwasserqualität.
2. Bereitstellen von quantitativen, entscheidungsunterstützenden Informationen zu den erwarteten Abwasservolumina und -konzentrationen bei veränderten Rahmenbedingungen (neue Abwassersatzung).

Mit der Studie verband Fürstenberg die Hoffnung, durch eine ganzheitliche Betrachtung auf andere Lösungen für die Bereiche Abwasser und Ressourceneinsatz zu stoßen und darüber hinaus eine externe Bewertung zu erhalten, welche Umweltrelevanz die betrieblichen Abläufe aufweisen.

6.4.3 Strukturierte Problemlösung

Im Zentrum der Studie standen die Bereiche Sudhaus, Lagerkeller, Filterkeller, Flaschenkeller und Keg-Anlage. Sie galt es zunächst anhand des verfügbaren Datenmaterials zu beschreiben und anschließend mithilfe einer Software zu modellieren.

Als Bewertungskriterien dienten der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) und die Einsatztemperatur. Dabei wurde nach drei Einsatzkategorien unterschieden:

- Wasser mit direktem Produktkontakt (Ausschübe)
- Wasser mit indirektem Produktkontakt (Wärmetauscher)
- Wasser ohne Produktkontakt (Bodenreinigung)

Der Ablauf erfolgte in vier Schritten:

1. Bestandsaufnahme
2. Datenanalyse
3. Modellierung
4. Bericht

Das Projektteam bestand aus dem Leiter des Qualitätsmanagements und zwei externen Beratern. Bei Bedarf wurden weitere Mitarbeiter hinzugezogen – beispielsweise aus dem Labor für Analysen und den Bereichen Technik und Produktion. Die Software zur Wasser-Pinch-Modellierung stellte das Beratungsunternehmen zur Verfügung. Die Datengrundlage war, was das Abwasser betraf, sehr gut. Einige darüber hinaus erforderliche Messungen führte das Labor durch. Die Modellierung und Ausarbeitung erfolgte extern durch die Berater. Die Projektdauer betrug ungefähr ein halbes Jahr.

6.4.4 Modellierung

Geschlossene Bilanzen sind für eine Wasser-Pinch-Analyse keine notwendige Voraussetzung. Wichtig ist jedoch, die Hauptwasserverbraucher und -produzenten zu ermitteln und zuverlässig zu quantifizieren. Der erste Schritt bei der Modellierung bestand demzufolge darin, die Wasserbilanz zu ermitteln – bei Fürstenberg kam dazu die Software WaterTracker™ zum Einsatz. Das resultierende Modell diente dazu,

- den Anlagenzusammenhang zu verstehen,
- die Aufmerksamkeit auf die Hauptprozessbereiche zu lenken,
- die Vollständigkeit und Korrektheit der Daten zu beurteilen,
- die Wasserbilanz zu erstellen und die Bilanz mit Fürstenberg abzustimmen (s. Abb. 6.17).

Einige kostenwirksame Möglichkeiten, das Wassersystem und die Betriebsverfahren zu verbessern, ließen sich bereits in der Phase der Daten-

sammlung und -modellierung ermitteln. Gleichzeitig stellte sich aber heraus, dass nur wenige Ströme ausreichend groß, kontinuierlich und sicher waren, um direkt für eine Wiederverwertung geeignet zu sein.

In der Absicht, die Anzahl neuer Leitungen auf ein Mindestmaß zu beschränken, entwickelte das Projektteam eine Strategie für die Platzierung von Pufferbehältern in Kernbereichen der Brauerei. Diese Behälter können allerdings nur in einem relativ geringen Einzugsbereich Wasser sammeln und weiterverteilen. Eine wenn auch eingeschränkte Übertragung von Wasser zwischen Pufferbehältern würde aber möglich bleiben.

Dieses Konzept wurde im Wasser-Pinch als Variante modelliert. Um zulässige Verbindungen zwischen Pufferbehältern und Prozessen zu definieren, wurden dabei Pufferbehälter und Randbedingungen vorgegeben. Die Software ermittelte dann, welche (Teile der) Ströme in welche Bereiche fließen sollten, um die niedrigsten Gesamtbetriebskosten zu erreichen. Anhand der

einggegebenen Randbedingungen und unter Berücksichtigung weiterer betrieblicher Restriktionen bestimmte das Programm schließlich den minimal möglichen Durchfluss für die Verbindungen. Das ökonomische Modell ermittelte die Frischwasserkosten und die Kostenstruktur der

Abwassergebühren, die von der Differenz zwischen dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) und dem biologischen Sauerstoffbedarf (BSB) des Abwassers abhing. Diese Differenz wird auch als „Differenz-Sauerstoffbedarf“ (DSB) bezeichnet.

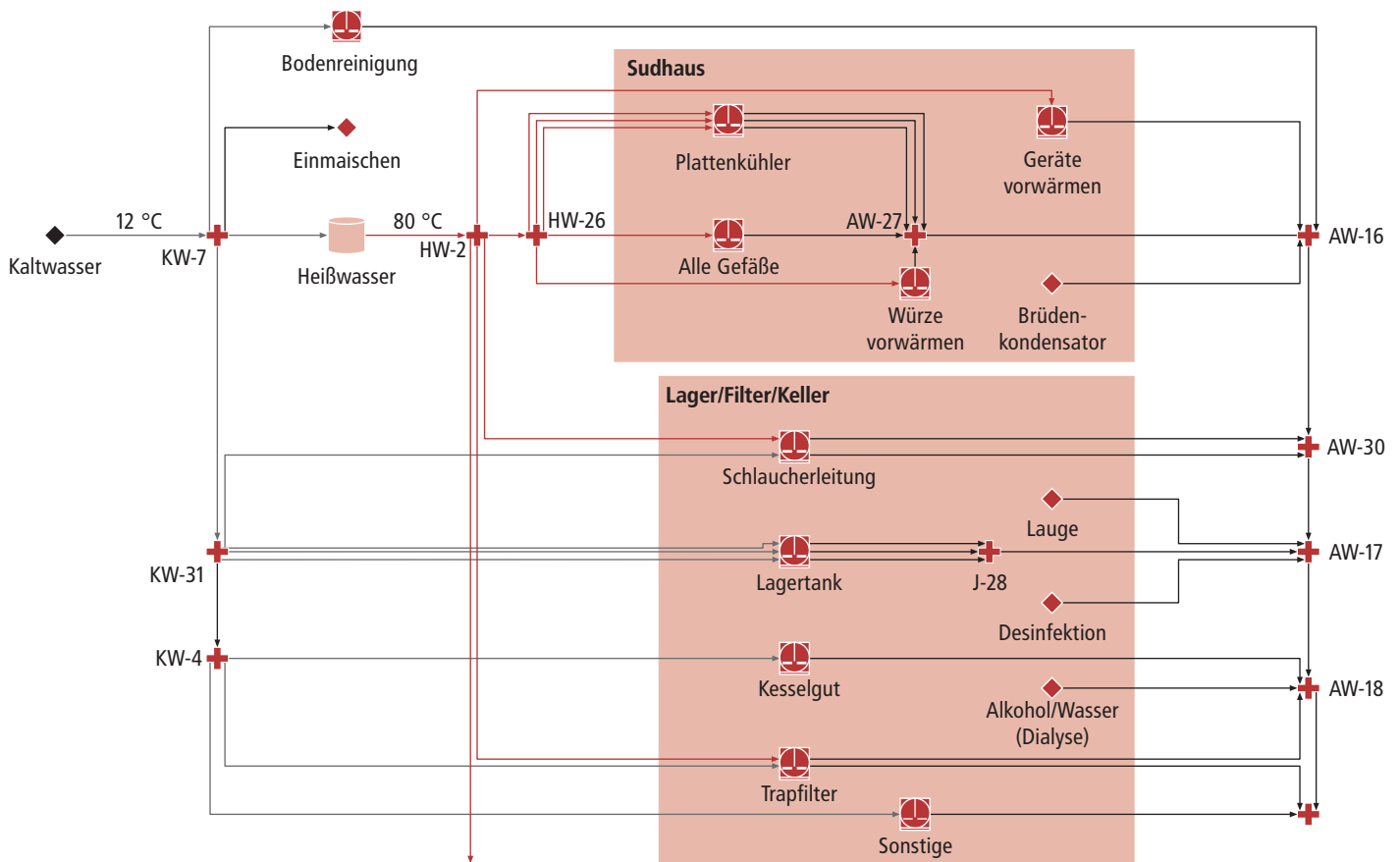


Abb. 6.17: Modell des Wasserversorgungssystems von Fürstenberg

6.4.5 Zielfestlegung

Bei der Wasser-Pinch-Studie entwickelte das Projektteam die Projektziele und -ideen gleichzeitig. Aus dem Softwaremodell ließ sich dann eine optimale Netzwerkstruktur ableiten – zusammen mit Zielen für die Frischwasserentnahme, die Abwasservolumen und die Ablaufkonzentrationen.

Nach einer einfachen Analyse des Datensatzes für den Ist-Zustand (s. Abb. 6.17) war es möglich darzustellen, wie Fürstenberg bisher Wasser wiederverwendete und wie das übrige Wasser als Abwasser abgeleitet wurde. Darüber hinaus zeigten die Kurven, dass es praktisch keine Möglichkeit gab, die Wiederverwendung von Wasser

zu steigern – außer der Betreiber würde Modifikationen einiger Prozesse in Betracht ziehen.

Im nächsten Schritt kategorisierte das Team alle Verbraucher danach, welche Hygienestandards sie einhalten mussten. Verbraucher, die in die unteren Kategorien fielen, kamen für Modifikationen in Betracht, weil sie möglicherweise eine niedrigere Wasserqualität als die derzeitige akzeptieren konnten.

Nachdem das Projektteam für einige Hauptanlagen die Spezifikationen für die Zulaufreinheit modifiziert hatte, nahm die Anzahl der Möglichkeiten, Wasser wiederzuverwenden deutlich zu. Darauf aufbauend ließen sich zwei große Projekte ermitteln, die bei einer geschätzten Investition von 20.000 Euro zu einer Ersparnis von 43.000 Euro pro Jahr führen würden. Ein beson-

derer Vorteil dieser Projektideen bestand darin, dass bei ihrer Umsetzung die Schadstoffkonzentrationen des Abwassers unterhalb der zulässigen Grenzwerte geblieben wären und ein Starkverschmutzerzuschlag hätte vermieden werden können (s. Abb. 6.18).

Weitere Einsparmöglichkeiten wies die Studie für diskontinuierliche Verbraucher aus. Sie setzten allerdings voraus, neue Pufferbehälter zu installieren. Um den zusätzlichen Nutzen dieser Installation für jeden einzelnen Bereich zu ermitteln, analysierte das Projektteam mehrere Szenarien. Gleichzeitig wurde überwacht, wie sich die Szenarien auf die Abwasser-Ablaufkonzentrationen auswirkten. Die Wirtschaftlichkeit dieser Szenarien hängt von den zukünftigen Strukturen der Abwasserkosten ab.

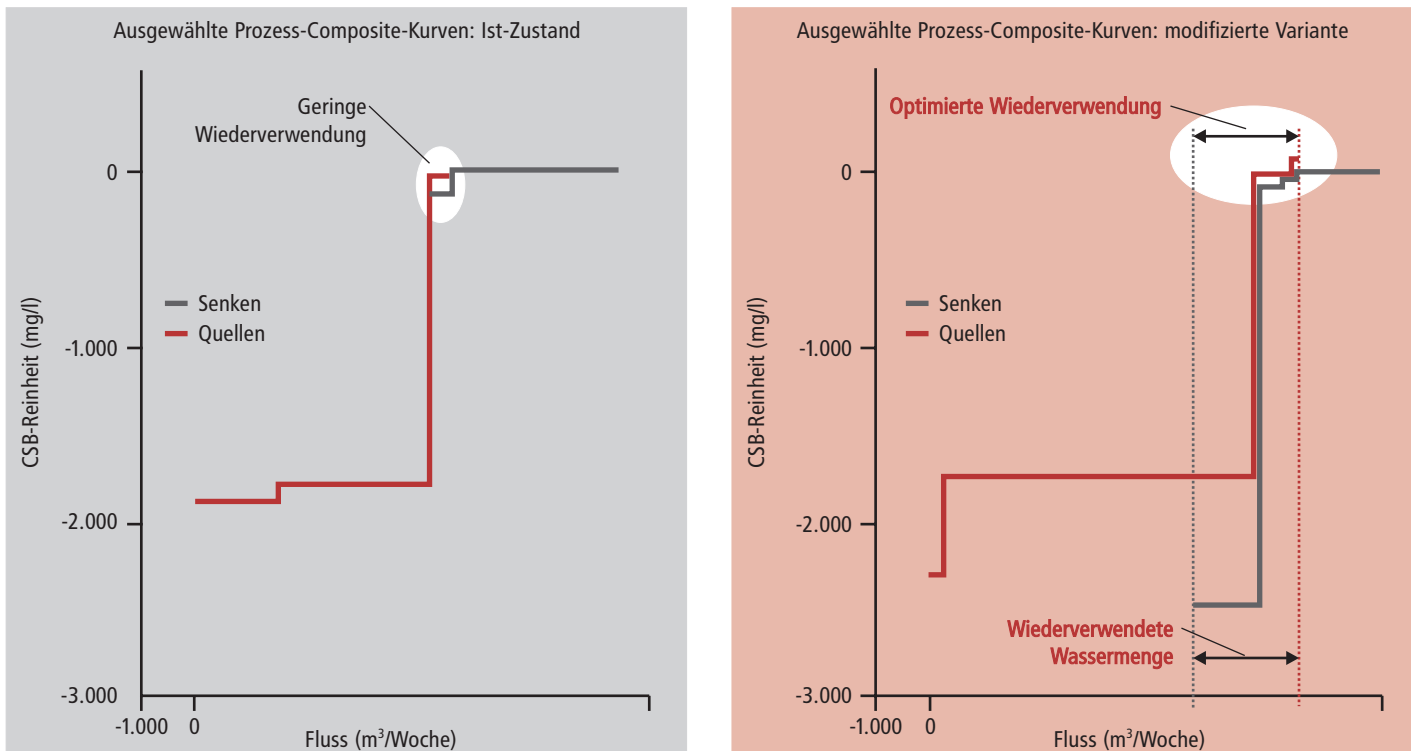


Abb. 6.18: Composite-Kurven für den Ist-Zustand und die modifizierte Variante

6.4.6 Ergebnisse

Vor Beginn der Studie stand Fürstenberg vor dem Problem, zwar einen branchenüblich hohen Wasserverbrauch zu haben – aber kaum Anreize, diesen zu senken. Denn jede Maßnahme etwa zur Kreislaufführung hätte bedeutet, dass die Abwassermenge ab- und die Schadstoffkonzentration zugenommen hätte. In diesem Fall aber wären für Fürstenberg hohe Starkverschmutzerzuschläge angefallen.

Die Pinch-Analyse half nicht nur, Projekte zur Wassereinsparung zu identifizieren – sie erlaubte darüber hinaus auch, Alternativen für die Struktur der Abwassergebühren zu entwickeln. Diese wurden den örtlichen Behörden als Vorschlag

unterbreitet, um darauf aufbauend ein Gebührensystem zu entwickeln, das industriellen Verbrauchern allgemein mehr Anreize zur Senkung des Frischwasserverbrauchs bietet. Für das bei Fürstenberg durchgeführte Projekt bedeutete dies, die Projektideen danach zu kategorisieren, ob sie für die derzeitige Gebührenstruktur galten oder erst nach einer Änderung der Struktur realisierbar waren.

Die verschiedenen Varianten wurden in der Roadmap (s. Abb. 6.19) in zwei getrennten Zweigen dargestellt. Variante A basierte auf der Annahme, dass eine neue Gebührenstruktur eingeführt wird, während Variante B die Möglichkeiten im

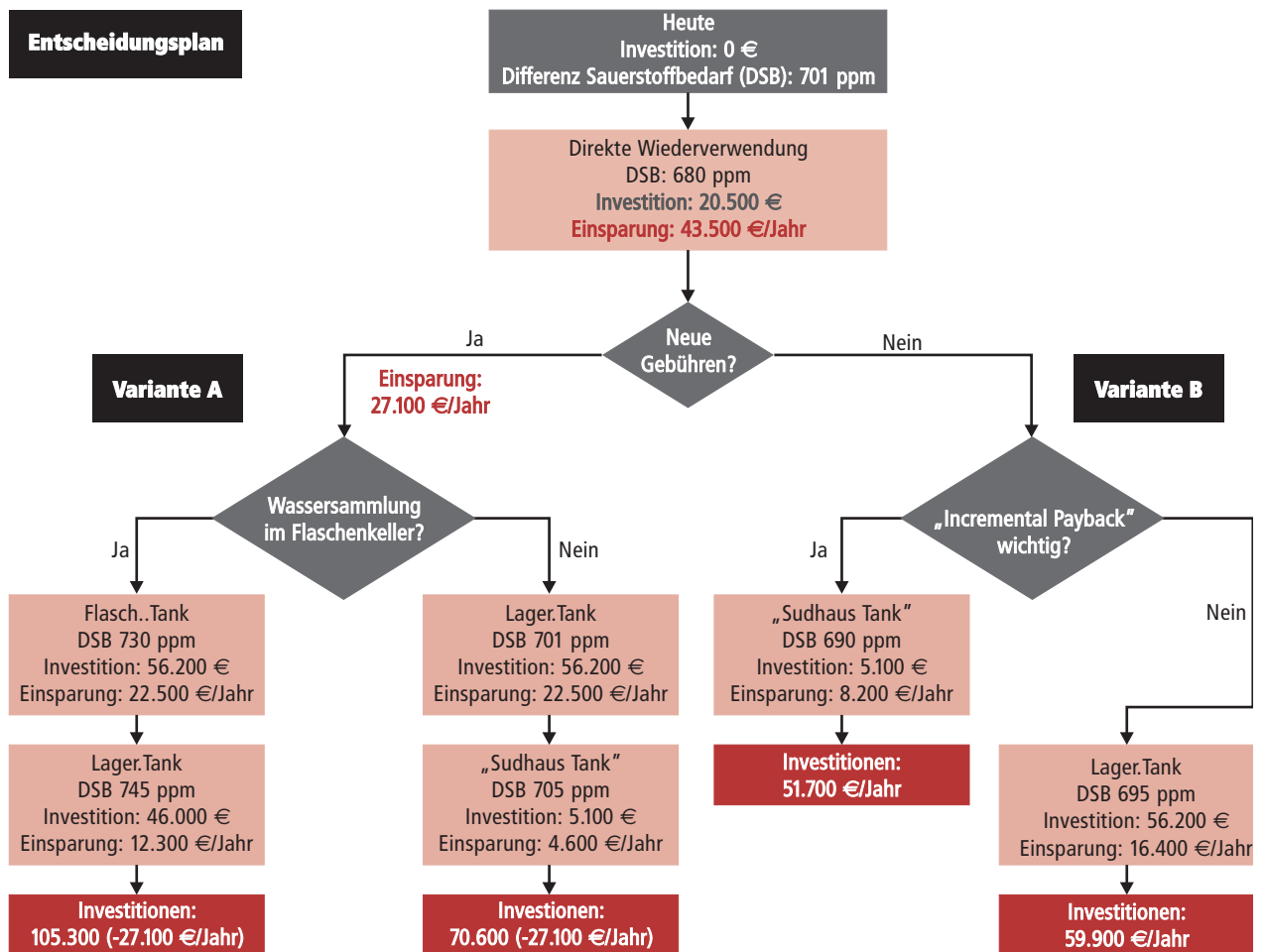


Abb. 6.19: Entscheidungsplan für Wassersparprojekte bei Fürstenberg (in €)

Rahmen der bestehenden Gebührenstruktur darstellt. Für beide Varianten erwiesen sich Pufferbehälter als besonders wertvoll. Die insgesamt größten Einsparungen ließen sich in einem zentralen Bereich der Brauerei erzielen: dem Flaschenkeller (s. Abb. 6.20 und 6.21). Allerdings war zu erwarten, dass die erforderlichen Prozessmodifikationen schwierig und teuer sein würden.

Eine akzeptable Amortisation dieser Investitionen ließe sich nur im Rahmen einer neuen Gebührenstruktur erzielen. Unter dieser Voraussetzung beliefen sich die maximalen Einsparmöglichkeiten bei den Betriebskosten auf 75.000 Euro pro Jahr und setzten voraus, neue Pufferbehälter im Flaschenkeller und im Lagertankbereich zu installieren. Ohne die neue Gebührenstruktur ergäbe sich eine maximale Ersparnis in Höhe von 60.000 Euro pro Jahr.

Da bis dato noch keine neue Gebührenstruktur vorliegt, wurden die vorgeschlagenen Maßnahmen bisher nicht umgesetzt.



Abb. 6.20: Bedienblock der Flaschenabfüllanlage (60.000 Flaschen je Stunde)

6.4.7 Fazit

Eines der nach Einschätzung von Fürstenberg wichtigsten Ergebnisse war die Erkenntnis, dass wider Erwarten im Bereich der Keg-Anlage ein vermeidbarer Frischwasserverbrauch vorlag. Die empfohlenen Gegenmaßnahmen erschienen umsetzbar, sind im Einzelfall aber noch im

Hinblick auf die eingangs genannten Restriktionen zu prüfen. Eine weitere Anwendung der Pinch-Technologie wäre aus Sicht von Fürstenberg gegebenenfalls für den Energiesektor – für das firmeneigene Blockheizkraftwerk – sinnvoll, wird aber derzeit nicht weiter verfolgt.



Abb. 6.21: Flaschenabfüllstraße

6.5 Boehringer Ingelheim Pharma KG, Biberach

6.5.1 Das Unternehmen



Boehringer Ingelheim erforscht, entwickelt, produziert und vermarktet mit rund 28.000 Mitarbeitern weltweit Arzneimittel. In Biberach an der Riss (Baden-Württemberg) steht das deutsche Forschungszentrum des Unternehmens. Dort entwickelt und produziert Boehringer mit rund 3.500 Mitarbeitern außerdem Biopharmazeutika – Arzneimittel auf biotechnischer Basis. Nachhaltig investiert der Unternehmensverband

in neue Gebäude, Technologien und die Infrastruktur sowie in die Qualifikation der Mitarbeiter. Allein für den Ausbau der Biopharmazeutischen Wirkstoffherstellung in Biberach werden mehr als 250 Millionen Euro aufgewendet, rund 400 neue Arbeitsplätze sind damit verbunden. In den modernen Forschungscampus vor Ort wurden in der Zeit von 1996 bis 2002 weitere rund 150 Millionen Euro investiert.

6.5.2 Die Ausgangssituation

Die Energieversorgung des Standorts Biberach beruht auf Kraft-Wärme-Kopplung. Angesichts der Liberalisierung des Strommarkts und sinkender Strombezugskosten stellte sich für Boehringer Ingelheim im Vorfeld der Studie die Frage, ob diese Art der Energieversorgung auf Dauer noch wirtschaftlich betrieben werden kann. Weiter sinkende Elektrizitätskosten hätten jedenfalls zusätzliche Investitionen in die Kraft-Wärme-Kopplung in Frage gestellt.

Die Hauptaufgabe des Versorgungssystems liegt in der Versorgung der Produktionsanlagen (s. Abb. 6.22) und in der Gebäudeklimatisierung durch Bereitstellung von Dampf für die Heizung und

Kaltwasser für die Kühlung. Ziel der Studie war, ein allgemeines Standort-Energiemodell zu erarbeiten, das Brennstoffe, Dampf, Strom, Kälte- und Kühllasten berücksichtigt. Das Modell sollte die Fähigkeit zum Import von Echtzeit-Betriebsdaten haben und anschließend folgende Zwecke erfüllen:

1. Erkennen betrieblicher Einsparmöglichkeiten
2. Unterstützen der Erkennung wirtschaftlicher Investitionsprojekte

Im Jahr 2000 wurde dazu eine Energieanalyse des Gesamtstandorts durchgeführt.



Abb. 6.22: Zellkultur-Fermentation im großtechnischen Maßstab bei Boehringer Ingelheim

6.5.3 Modellierung

Um die Wechselwirkungen zwischen dem Dampf-, Strom- und Kältesystem vollständig verstehen zu können, entwickelte das Projektteam mithilfe der Steam97™-Software eine Simulation des derzeitigen Versorgungssystems (s. Abb. 6.23).

Das Modell wurde entwickelt unter Einbeziehung der betrieblichen Kenndaten aller Hauptkomponenten der Anlagen wie der Gasturbine und der Abhitzekessel (AHK), Dampfkessel, Kälteanlagen und Kaltwasserpumpen. Das Modell sollte in der Lage sein, die folgenden Versor-

gungssystem-Szenarios abzubilden und zu beurteilen:

- Variierender Versorgungsbedarf des Standorts, einschließlich täglicher, wöchentlicher und jahreszeitlicher Schwankungen
- Variierende Versorgungskosten wie Änderungen der Stromtarife
- Alternative Gasturbinen-Betriebsarten
- Alternative Betriebsfolge der Kälteanlagen

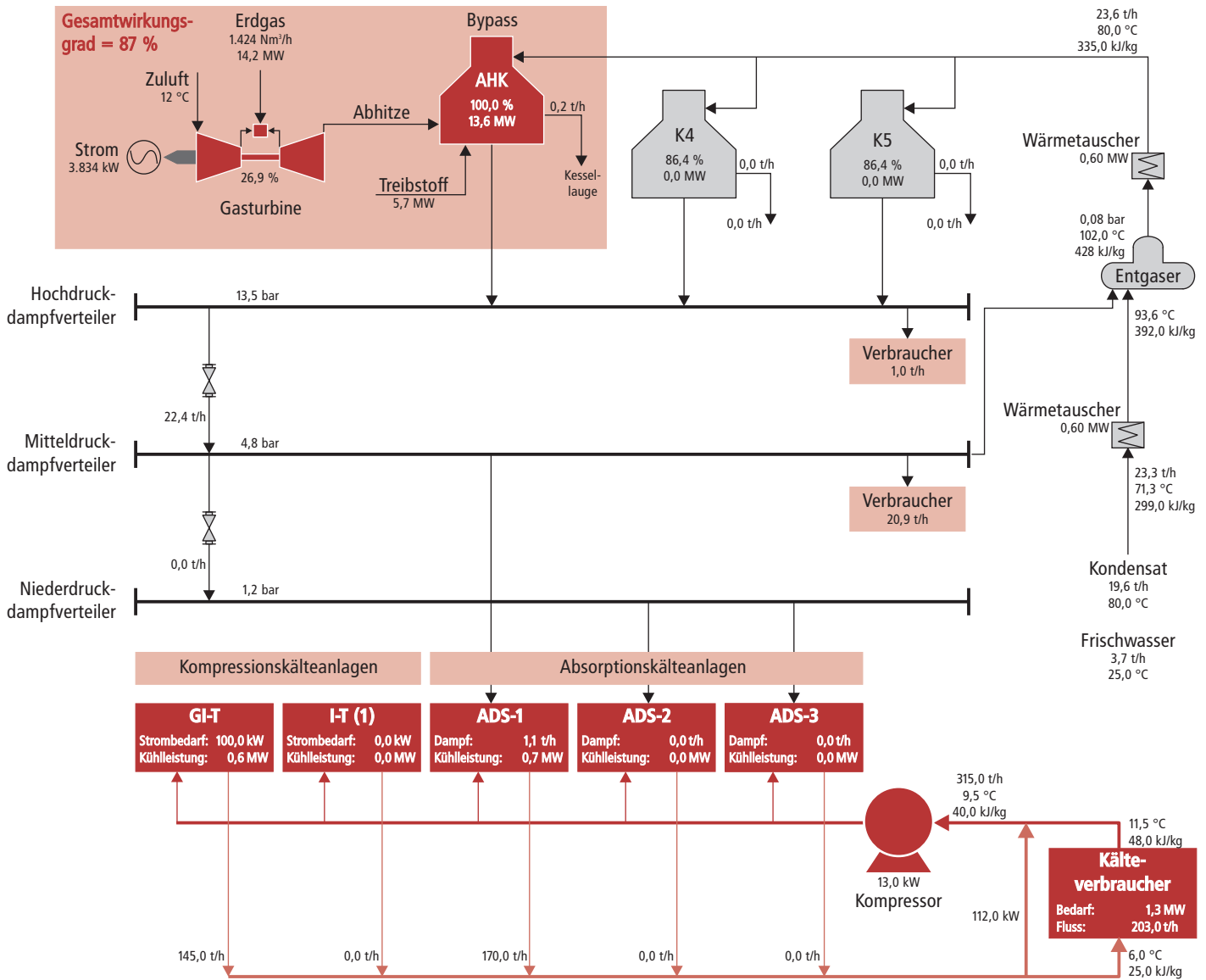


Abb. 6.23: Das Modell des Versorgungssystems von Boehringer Ingelheim

6.5.4 Zielfestlegung

Der Nutzen alternativer Betriebsszenarios ließ sich bewerten anhand der Analyse von Versorgungstarifen und der Effizienz von Versorgungsanlagen. Drei alternative Szenarios erwiesen sich dabei als potenziell nützlich:

Betrieb der Gasturbine zur Deckung des Spitzenbedarfs:

Dieser Vorschlag sah eine Verlagerung der Betriebsphilosophie vor – von der Energieerzeugung vor Ort hin zum Import von Strom. Denn niedrigere Elektrizitätspreise hätten begünstigt, die Grundlast mit importiertem Strom zu decken und die Gasturbine – anders als bisher – nur zur Deckung des Spitzenbedarfs zu betreiben.

Änderung der Reihenfolge des Kälteanlagenbetriebs:

Boehringer Ingelheim verfügt am Standort Biberach über zwei mechanische Kälteanlagen und drei Absorptionskältemaschinen. Ihre optimale Reihenfolge hing ebenfalls von den Stromtarifen ab. Das günstigste Szenario hätte vorge-

sehen, bevorzugt mechanische Kälteanlagen einzusetzen.

Herunterfahren der Gasturbine in Zeiten mit niedrigem Dampfbedarf:

Die frühere Betriebspolitik sah vor, die Absorptionskälteanlagen dann einzuschalten, wenn der Dampfbedarf niedrig war. Dies erlaubte, den Dampfbedarf über dem minimalen Erzeugungsvolumen des Abhitzeessels der Gasturbine zu halten. Vor dem Hintergrund der neuen Stromtarife hätte sich allerdings empfohlen, die Gasturbine mit einer geringeren Last zu betreiben, um die Dampferzeugung durch den Abhitzeessel zu minimieren.

Die im Laufe dieser Studie identifizierten Möglichkeiten zur Betriebskosteneinsparung beliefen sich insgesamt auf 140.000 Euro pro Jahr, was zwei Prozent der gegenwärtigen Versorgungskosten des Standorts entsprach. Zwei weitere Möglichkeiten ermittelte Boehringer parallel zu dieser Studie und setzte sie um.

6.5.5 Fazit

Ein für Boehringer Ingelheim nach eigenen Angaben interessantes Ergebnis dieser Arbeit war, dass der Betrieb der Gasturbine zur Deckung des Spitzenbedarfs das größte Potenzial bieten Betriebskosten einzusparen, diese Betriebsart jedoch noch andere Auswirkungen hat:

Notversorgung:

Gegenwärtig stellt die Gasturbine eine Reserve für die Stromversorgung dar. Fällt die externe Stromversorgung aus, kann Gasturbinenstrom den Grundbetrieb aufrechterhalten. Durch Änderung der Betriebsart würde allerdings diese unmittelbare Reserve wegfallen.

Umweltschutzaspekte:

Die vorgeschlagene Betriebsart bietet Boehringer Ingelheim einen finanziellen Vorteil, wirkt sich jedoch negativ auf die globalen Emissionen aus.

Die Stromerzeugung in der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage ist effizienter als die in einem konventionellen Kraftwerk. Daher führt die Erhöhung der Stromimporte zu einer Zunahme der globalen Emissionen.

Rückblickend bewertete Boehringer Ingelheim als besonders positiv, dass das Versorgungssystemmodell ein schnelles und genaues Hilfsmittel darstellt, um die Vorteile verschiedener Betriebsarten zu beurteilen. Da sich die Versorgungstarife und der Versorgungsbedarf ständig ändern, sah Boehringer Ingelheim es als besonders wünschenswert an, das Modell zu einem online verwendbaren Optimierungswerkzeug weiterzuentwickeln.

6.6 Hinweise zum Vorgehen und Erfolgsfaktoren für Pinch-Projekte

Bevor man den Aufwand für eine Pinch-Analyse betreibt, gilt es zu klären, ob folgende Voraussetzungen vorliegen:

- Liegen komplexe Verhältnisse vor, die ein Einsparpotential von mehr als zehn Prozent versprechen?
- Gibt es für die Umsetzung der Ergebnisse und Projekte eine hohe Priorität von Seiten der Geschäftsführung?
- Steht ein firmeninterner Koordinator als ständiger Ansprechpartner zur Verfügung, der zeitlich verfügbar ist, wenn externe Berater vor Ort sind?
- Ist die Bereitschaft der beteiligten Ingenieure und Kaufleute da, Daten und plausible Schätzungen für die Pinch-Analyse zu liefern – ohne sich in peniblen Datenerhebungen zu verzetteln?

Besondere Stolpersteine bei der Durchführung einer Pinch-Analyse können sein:

- Ungenügende oder unsystematische Datenlage
- Unbestimmbare Betriebsunterbrechungen – beispielsweise Papierabriss bei der Papierproduktion
- Eingeschränkte räumliche Möglichkeiten, technische Änderungen oder Neuerungen einzuführen, aufgrund historisch gewachsener Anlagenstrukturen
- Restriktive externe oder gesetzliche Anforderungen an die Betriebsbedingungen und -kosten – beispielsweise Produktionsbestimmungen oder unflexible Abwasserkostenstrukturen
- Voreingenommenheit gegenüber externen Vorschlägen („not-invented-here-Syndrom“)

Erfolgsfaktoren

- Klare Vereinbarung der Zielsetzungen (Kostenbetrachtung versus Einhaltung der Genehmigungsaufgaben)
- Klares Verständnis der Ausgangssituation und Problemstellung
- Die Datensituation und der Aufwand zur Datenbeschaffung bzw. -aufbereitung sollten realistisch eingeschätzt werden
- Es sollten Grundkenntnisse der Pinch-Technologie und Pinch-Methodik bekannt sein

Die Erfahrungen aus den Pilotprojekten hat gezeigt, dass die Pinch-Technologie in folgenden Bereichen sinnvolle Anwendungen findet:

- Emissionsminderung (Abwasser)
- Kosteneinsparung
- Energieeinsparung

Ihren größten Nutzen entfaltet die Pinch-Technologie hierbei:

- beim Einsatz in der Planungsphase und
- in der klaren Analyse des Ist-Zustands.

Da während der Pinch-Analyse komplexe Prozesse modelliert und die thermodynamischen und ökonomischen Parameter berechnet werden müssen, ist der Einsatz einer geeigneten Software unumgänglich.

Da Unternehmen selten für Projekte eigene Softwarepakete anschaffen wollen, wird in der Regel ein Pinch-Projekt mit externer Unterstützung von erfahrenen Beratern durchgeführt. Diese stellen meist das geeignete Software-Tool für den Projektzeitraum zur Verfügung.

Sollte das Unternehmen dann den Kauf einer Lizenz erwägen, ist auch der Schulungs- und Einweisungsaufwand mit zu kalkulieren.

Anhang A: Grundlagen der Pinch-Technologie

A 1 Allgemeine Hinweise

Kapitel 3 und 4 geben eine Einführung in die Pinch-Technologie – an dieser Stelle soll die Thematik für technisch Interessierte vertieft werden. Im Folgenden finden sich Erläuterungen zum Energie- oder Wärme-Pinch, zum Wasser-Pinch und zur Analyse ganzer Standorte (Total-Site-Analyse). Zudem stellt dieser Anhang dar, welche Verbesserungen in den einzelnen Fällen prinzipiell ausgeführt werden können.

Ziel des Pinch-Konzepts ist, die Energie- und Hilfsstoffnutzung in einzelnen Prozessen zu analysieren und zu optimieren. Die Pinch-Methodik erlaubt, sowohl für den Gesamtenergieverbrauch als auch für die eingesetzten Hilfsstoffe den theoretisch minimalen Bedarf zu berechnen. Dies ermöglicht es, den Gesamtbedarf zu optimieren und darüber hinaus die Effizienz zu steigern, mit der Energie und Hilfsstoffe zugeführt werden. Bei der Erweiterung der Analyse auf weitere Teile des Versorgungssystem hilft die Total Site-Analyse, standortweit Prozesse zu integrieren.

Weil die Pinch-Technologie auf einer strukturierteren Vorgehensweise fußt, ermöglicht sie es, alle praktischen und wirtschaftlichen Verbesserungspotenziale zu bewerten – sowohl auf Ebene einzelner Prozesse und Anlagen als auch auf Ebene ihrer Kombination miteinander. Die Ergebnisse der Analyse lassen sich dann in einem Entscheidungsplan darstellen, der als Grundlage für die Investitionsstrategie dient. Er enthält eine ausführliche Aufstellung darüber, welche Einsparungen möglich sind, und gibt Aufschluss darüber, inwieweit die Projekte miteinander und mit dem bestehenden Versorgungssystem kombinierbar sind.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Grundlagen der Pinch-Technologie für den Energiebereich. Daran anschließend finden Sie eine Darstellung des Wasser-Pinchs, die auch auf die Sensitivitätsanalyse bei mehreren Qualitätsparametern eingeht.

A 2 Methodik des Wärme-/Energie-Pinchs

A 2.1 Das Konzept der Composite-Kurven

Die Auswertung der wesentlichen Parameter eines Prozessmodells erfolgt mit so genannten Composite-Kurven. Diese Composite-Kurven dienen dazu, einen Zielwert für den minimalen Energieverbrauch eines Prozesses zu ermitteln. Bei den Kurven handelt es sich um Profile des Wärmeangebots im Prozess („heiße Composite-Kurve“) und des Wärmebedarfs im Prozess („kalte Composite-Kurve“). Der Überdeckungsgrad der Kurven ist ein Maß für das Potenzial zur Wärmerückgewinnung.

Die Composite-Kurven zu erzeugen erfordert lediglich eine vollständige und einheitliche

Wärme- und Massenbilanz des jeweiligen Prozesses. Sie lässt sich aus einer oder mehreren der folgenden Quellen ableiten:

- Anlagenmessungen
- Entwurfsdaten
- Simulationen

Die aus diesen Quellen extrahierten Daten definieren Prozessströme hinsichtlich ihres Heiz- oder Kühlbedarfs. Ein einfaches Beispiel für die benötigten Daten zeigt die folgende Tabelle A 1.

Der Beispielprozess in Abbildung A 1 besitzt zwei heiße Ströme (Strom 1 und 2). Dabei wird die Wärmekapazitäts-Flussrate (CP) betrachtet. CP ist definiert ist als: (Massenstrom) x (Wärmekapazität) und wird anhand der Enthalpieänderung je Temperatureinheit (in der Einheit kW/°C) gemessen. Strom 1 beispielsweise gibt 2.000 Kilowatte Wärme ab und wird dabei um 100 °C (von 180 °C auf 80 °C) abgekühlt. Somit hat er einen Wärmekapazitätsstrom von 20 kW/1 °C.

Abbildung A 1 (A) zeigt die heißen Ströme einzeln in einem Temperatur-Enthalpiediagramm. Die heiße Composite-Kurve in Abb. A 1 (B) entsteht, indem die Enthalpieänderungen der Ströme in den jeweiligen Temperaturintervallen addiert werden. Im Temperaturintervall von 180 °C bis 130 °C ist nur Strom 1 vorhanden. Daher entspricht der Wärmekapazitätsstrom der Composite-Kurve dem Wärmekapazitätsstrom von Strom 1 – also 20 kW/°C. Im Temperaturintervall von 130 °C bis 80 °C sind Strom 1 und Strom 2 vorhanden. Der Wärmekapazitätsstrom der

Strom	Stromtyp	Eingangstemperatur in °C	Ausgangstemperatur in °C	Leistung in kW	CP in kW/°C
1	Heiß	180	80	2.000	20
2	Heiß	130	40	3.600	40
3	Kalt	60	100	3.200	80
4	Kalt	30	120	3.240	36

Tab. A 1: Basisdaten für die Prozesströme im Beispiel

heißen Composite-Kurve ist hier die Summe des Wärmekapazitätsstroms der beiden Ströme – also 20 kW/°C + 40 kW/°C = 60 kW/°C. Im Temperaturintervall von 80 °C bis 40 °C ist nur Strom 2 vorhanden, der Wärmekapazitätsstrom der Composite-Kurve beträgt demzufolge 40 kW/°C.

Die Erzeugung der kalten Composite-Kurve ähnelt der der heißen Composite-Kurve und erfolgt durch Kombination der T-H-Kurven der kalten Ströme (Strom 3 und 4) im Prozess.

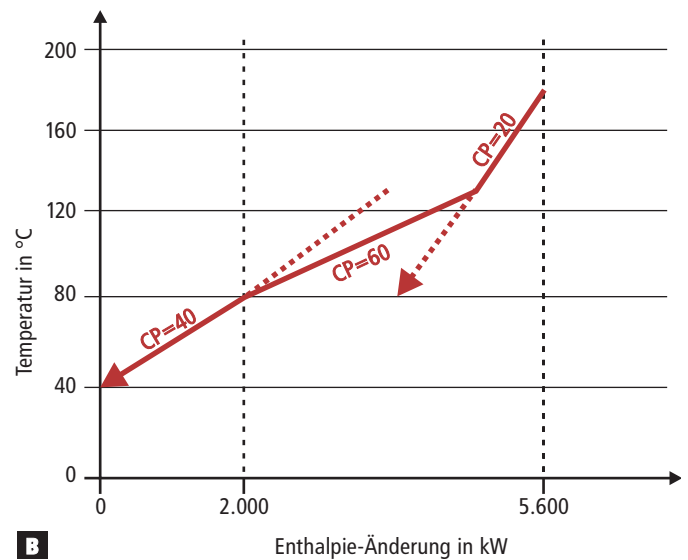
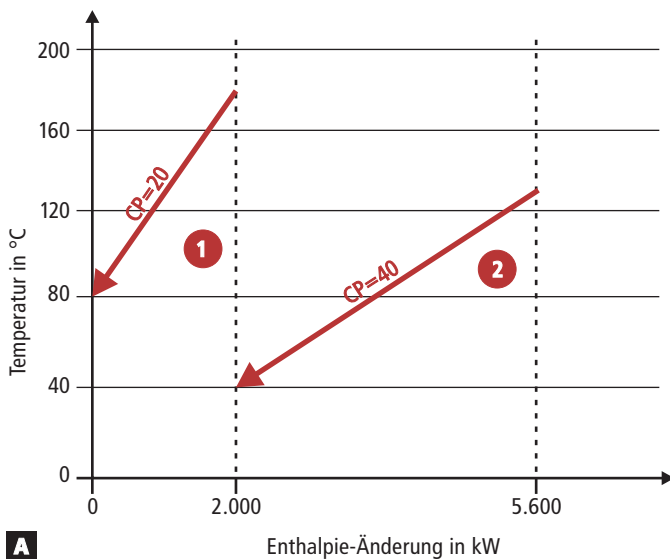


Abb. A 1: Erzeugung von Composite-Kurven

A.2.2 Ermittlung des Energieoptimums

Um nun das Energieoptimum (auch Target genannt) für den Prozess zu ermitteln, werden die heiße und die kalte Composite-Kurve in ein Diagramm gezeichnet. Dann wird die kalte Composite-Kurve solange horizontal nach links verschoben, bis sich heiße und kalte Composite-Kurve so weit annähern, dass der vertikale Abstand an der Engstelle (Pinch-Punkt) der minimal zulässigen Temperaturdifferenz ΔT_{\min} entspricht (s. Abb. A 2 [A]). Deren Wert ergibt sich aus Erfahrungswerten, ist prozessspezifisch und gibt den minimalen Temperaturunterschied an, bei dem die betrachteten verfahrenstechnischen Prozesse noch physikalisch und wirtschaftlich sinnvoll ablaufen. Für den Beispielprozess wurde dafür ein Wert von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet.

der Pinch-Technologie wurden Techniken entwickelt, die erlauben, den optimalen Wert für ΔT_{\min} zu ermitteln – sowohl für Neuentwürfe als auch für Nachrüstungssituationen.

■ Form der Composite-Kurven:

In der Regel wird für Composite-Kurven, die nahezu parallel verlaufen, ein höherer Wert für ΔT_{\min} ausgewählt als für Systeme, die stark divergieren.

■ Erfahrungswerte:

In Systemen, in denen leicht Verschmutzungen auftreten oder in denen die Wärmedurchgangskoeffizienten niedrig sind, werden

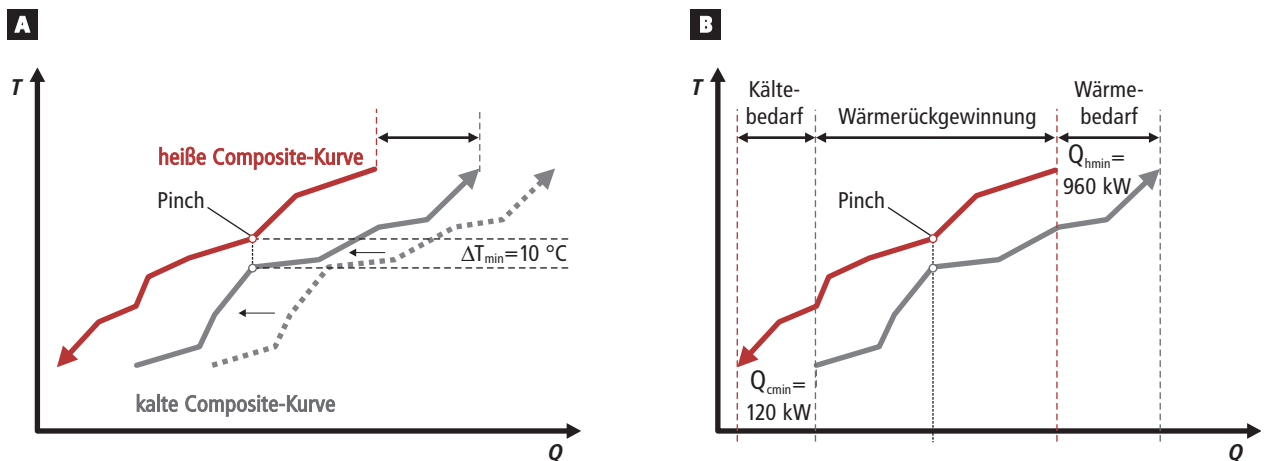


Abb. A 2: Verwendung der Composite-Kurven zur Ermittlung des Energieoptimums

Die damit erreichte Überlappung der Composite-Kurven zeigt die maximal mögliche Prozesswärmerückgewinnung an (siehe Abb. A 2 [B]). Im Beispiel beträgt der minimale verbleibende Heizmittelbedarf ($Q_{H\min}$) 960 Kilowatt und der minimale Kühlmittelbedarf ($Q_{C\min}$) 120 Kilowatt für die gewählte Temperaturdifferenz ΔT_{\min} .

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass ein berechnetes Energieoptimum in starkem Maße vom Wert für ΔT_{\min} abhängt. Bei der Festlegung dieses Werts spielen mehrere Faktoren eine Rolle:

■ Investitionsausgaben:

Je kleiner der Wert von ΔT_{\min} ist, desto größer ist die erforderliche Wärmeaustauschfläche in allen neuen Wärmetauschern und desto höher sind die Investitionskosten. Im Rahmen

normalerweise höhere Werte für ΔT_{\min} ($30\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$) verwendet. Für chemische Prozesse und für Prozesse, bei denen Hilfsstoffe für die Wärmeübertragung verwendet werden, liegen die Werte in der Regel zwischen $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bei Prozessen unterhalb der Umgebungstemperatur, bei denen Kälte erzeugt wird, wird eine große Annäherung ($3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$) verwendet, um den kostspieligen Strombedarf zu minimieren.

Basierend auf den Wärme- und Massenbilanzinformationen lassen sich mit der Pinch-Analyse also bereits vor dem Entwurf des Wärmetauschernetzes Zielvorgaben für den minimalen Energieverbrauch festlegen. Dadurch ist das Potenzial für Energieeinsparungen in einer frühen Phase der Analyse erkennbar.

A 2.3 Das Pinch-Prinzip

Die Engstelle, die bei Annäherung der heißen und der kalten Composite-Kurven (bis ΔT_{\min}) entsteht, wird als „Pinch“ bezeichnet. Die zugehörigen Punkte auf den Composite-Kurven werden Pinch-Punkte genannt.

Ist der Pinch erreicht, dann lässt sich der Prozess in zwei getrennte Systeme unterteilen: eines oberhalb und eines unterhalb des Pinchs. Das System oberhalb des Pinches benötigt Wärmezufuhr und ist daher eine Nettowärmesenke. Das System unterhalb des Pinch-Punkts gibt Wärme ab und ist somit eine Nettowärmequelle.

Bei der Suche nach dem minimalen Energieverbrauch für einen Prozess sind drei Grundregeln zu beachten:

- Wärme darf nicht über den Pinch hinweg übertragen werden.
- Oberhalb des Pinchs dürfen keine Kühlmittel verwendet werden.
- Unterhalb des Pinchs dürfen keine Heizmittel verwendet werden.

A 2.4 Zielfestlegung für mehrere Hilfsstoffe: die Grand Composite-Kurve

Bei den meisten Prozessen erfolgt die Heizung und Kühlung durch Hilfsstoffe (Utilities) auf verschiedenen Temperaturniveaus – beispielsweise durch verschiedene Dampfdrücke oder Kältestufen, durch einen Thermoölkreislauf oder durch Gasbrenner usw. Um die Energiekosten zu minimieren, gilt es, den Einsatz von kostengünstigeren Hilfsstoffen zu maximieren und den von teureren zu minimieren – beispielsweise durch Bevorzugen von Niederdruckdampf gegenüber Hochdruckdampf und Kühlwasser gegenüber der Kälteerzeugung.

Composite-Kurven liefern zwar die allgemeinen Energieoptima. Sie geben aber nicht eindeutig an, wie viel Energie auf welchen Hilfsstoff-Niveaus geliefert werden muss. Darüber gibt die Grand Composite-Kurve Aufschluss: Sie ist das Mittel der Wahl, wenn es darum geht, mehrere Hilfsstoffniveaus zu optimieren, denn sie stellt das Energiedefizit des Prozesses (oberhalb des Pinchs) und den Energieüberschuss (unterhalb des Pinchs) als eine Funktion der Temperatur dar. Sie stellt die Differenz der heißen und kalten Composite-Kurve reduziert um ΔT_{\min} dar. Das heißt: Beim Pinch-Punkt berührt die Grand Composite-Kurve die vertikale Achse.

Abbildung A 3 (A) zeigt eine Grand Composite-Kurve, bei der für die Beheizung des Prozesses (teurer) Hochdruckdampf eingesetzt und für die Kühlung (kostenintensive) Kälte erzeugt wird. Zur Senkung der Versorgungskosten empfiehlt es sich, Zwischenstufen einzufügen – also

(preiswerteren) Mitteldruckdampf und Kühlwasser. Abbildung A 3 (B) zeigt die Ziele für alle Hilfsstoffe.

Der maximale Einsatz von Mitteldruckdampf lässt sich durch eine waagerechte Linie ermitteln, die auf dem Temperaturniveau des Mitteldruckdampfes von der y-Achse aus so lange gezogen wird, bis sie die Grand Composite-Kurve berührt. Hochdruckdampf wird ab jetzt nur noch dazu benötigt, die verbleibende Heizleistung zu erbringen. Demnach wird der Verbrauch von Hochdruckdampf zugunsten des Einsatzes von Mitteldruckdampf minimiert, was die Gesamtversorgungskosten ebenfalls senkt. Eine ähnliche Konstruktion unterhalb des Pinch-Punkts erlaubt es, den Einsatz von Kühlwasser zu maximieren und die Kälteerzeugung zu minimieren.

Die Punkte, an denen Mitteldruckdampf- und Kühlwasserniveaus die Grand Composite-Kurve berühren, werden als „Utility Pinches“ bezeichnet. Ähnlich wie beim Prozess-Pinch stellt die Wärmeübertragung über einen Utility-Pinch hinweg eine Ineffizienz dar. Beim Prozess-Pinch besteht die Ineffizienz in einer Erhöhung des Gesamtenergieverbrauchs über das Ziel hinaus. Bei einem Utility-Pinch besteht die Ineffizienz darin, dass die Wärmelast unnötigerweise von einem billigeren Hilfsstoffniveau auf ein teureres Niveau verlagert ist. Wie beim eigentlichen Pinch (manchmal Prozess-Pinch genannt) lässt sich das Ziel für eine effiziente Hilfsstoffnutzung dadurch erreichen, dass die Wärme, die über den Utility-

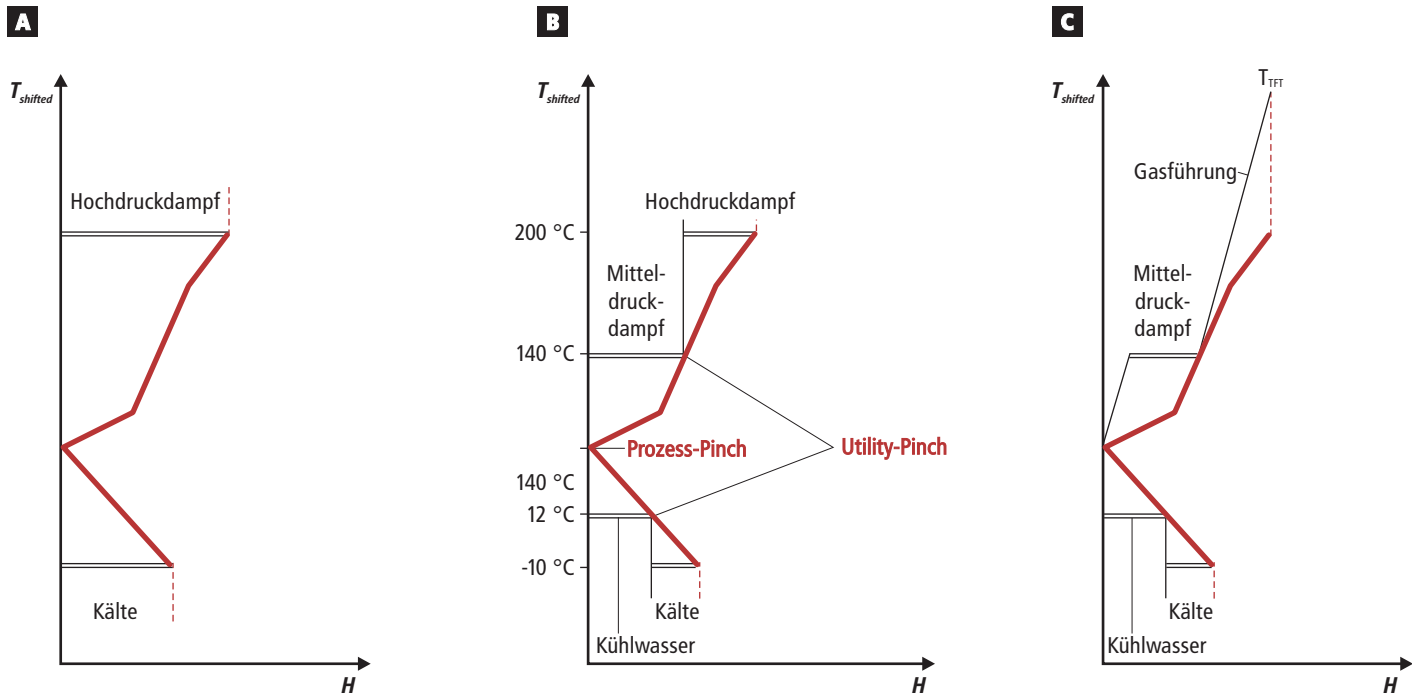


Abb. A 3: Grand Composite-Kurve für die Festlegung von Zielen für verschiedene Hilfsstoffe

Pinch hinweg übertragen wird, korrigiert wird. Abbildung A 3 (C) zeigt eine andere Variante verschiedener Hilfsstoffniveaus. Hier kommt eine Gasfeuerung anstelle von Hochdruckdampf zum Einsatz. Der Rauchgasstrom wird als schräge

Kurve von der theoretischen Flammtemperatur T_{TFI} bis zum Temperaturniveau des Mitteldruckdampfs gezeichnet. Auch die Restwärme zwischen Pinch-Temperatur und MD-Dampf kann im Prozess genutzt werden.

A 2.5 Allgemeine Prinzipien für Prozessmodifikationen

Der von den Composite-Kurven festgelegte minimale Energiebedarf basiert auf einer bestimmten Wärme- und Materialbilanz für den Prozess. Die Energieoptima, die die Composite- und Grand Composite-Kurven beschreiben, basieren auf diesen festen Prozessbedingungen, sie haben also keine Auswirkungen auf die grundlegenden Energieanforderungen und Prozesstemperaturen.

Weitere Verbesserungspotenziale ergeben sich aus Prozessmodifikationen, das heißt aus Änderungen dieser Bedingungen. So kann eine Änderung der Prozessströme beispielsweise den Hilfsstoffbedarf für den Prozess weiter senken. Ein vergleichbarer Spareffekt kann aber auch bei einer Anpassung anderer Parameter erzielt werden, etwa der Betriebsdrücke und Rücklauf-

verhältnisse der Destillationskolonne, der Verdampfungsdrücke, der Umpumpleistung, der Reaktorumwandlung usw. All diese Prozessparameter beeinflussen die Prozesstemperaturen und -energieleistungen und können daher durch entsprechende Modifikationen ebenfalls genutzt werden, um die Wärmerückgewinnung zu verbessern.

Die Anzahl der Möglichkeiten ist so groß, dass es äußerst zeitaufwendig wäre, umfassend nach den drei oder vier Parametern zu suchen, die zum allgemeinen Nutzen des Prozesses geändert werden können. Um die Hauptprozessparameter zu ermitteln, die sich auf den Energieverbrauch besonders positiv auswirken, lassen sich jedoch auf Grundlage der Pinch-Analyse thermodynamische Regeln anwenden.

A 2.6 Das „Plus-Minus“-Prinzip für Prozessmodifikationen

Die Wärme- und Materialbilanz des Prozesses bestimmt die Form der Composite-Kurven. Wenn sich die Wärme- und Materialbilanz ändert, ändern sich auch die Composite-Kurven und somit die Menge der Wärme, die zurückgewonnen werden kann.

Im Allgemeinen wird der Heizmittelbedarf reduziert durch:

- Erhöhen der Leistung der heißen Ströme oberhalb des Pinch-Punkts
- Senken der Leistung der kalten Ströme oberhalb des Pinch-Punktes

Analog dazu wird der Kühlmittelbedarf reduziert durch:

- Senken der Leistung der heißen Ströme unterhalb des Pinch-Punkts
- Erhöhen der Leistung der kalten Ströme unterhalb des Pinch-Punkts

Dies wird als „Plus-Minus“-Prinzip für Prozessmodifikationen bezeichnet. Dieses einfache Prinzip bietet einen Bezugspunkt für jede Anpassung der

Prozesswärmeleistung und gibt an, welche Modifikationen von Vorteil und welche von Nachteil wären.

Häufig ist es möglich, anstelle der Wärmeleistung die Temperaturen zu ändern. Aus den Composite-Kurven ist klar ersichtlich, dass Temperaturänderungen, die sich auf eine Seite des Pinchs beschränken, keine Auswirkungen auf die Energieoptima haben werden. Temperaturänderungen über den Pinch hinweg können jedoch die Energieoptima ändern. Beispielsweise verlagert Senken eines Verdampfungsdrucks eine Verdampfungsleistung aus dem Bereich oberhalb des Pinchs in den Bereich unterhalb. Infolgedessen wird der Prozess-Energiebedarf um die Verdampfungsleistung reduziert.

Somit lässt sich die Strategie für die Verschiebung von Prozesstemperaturen folgendermaßen zusammenfassen:

- Verlagere heiße Ströme aus dem Bereich unterhalb des Pinchs in den Bereich oberhalb.
- Verlagere kalte Ströme vom Bereich oberhalb des Pinchs in den Bereich unterhalb.

A 2.7 Betrachtung ganzer Standorte: die Total-Site-Analyse

Wenn mehrere Prozesse an einem einzelnen Standort auf dem Prüfstand stehen, ist es unbedingt erforderlich, die Wechselwirkungen zwischen den Prozessen und dem Versorgungssystem zu untersuchen. Dies erweist sich insbesondere dann als vorteilhaft, wenn eine direkte Wärmeintegration zwischen den Prozessen nicht möglich ist, weil sie räumlich voneinander entfernt sind oder nicht gekoppelt werden sollen. In solchen Fällen hängen die Einsparungen, die bei einzelnen Prozessen erzielt werden können, davon ab, ob sich über das Versorgungssystem eine indirekte Integration erreichen lässt.

Das Optimierungspotenzial einer indirekten Integration lässt sich mithilfe der Total-Site-Analyse ermitteln. Die Analyse gibt Aufschluss über

- das optimale Gleichgewicht von Prozessdampferzeugung und -verbrauch,
- die optimalen Dampfverteildrücke.

Die Total-Site-Analyse unterteilt die Prozess-Wärmebilanz in Wärmequellen und Wärmesenken und stellt diese dann in Quellen-Senken-Profilen für den Standort dar (s. Abb. A 4). Die linke Seite des Diagramms zeigt die Prozess-Wärmequellen – die rechte Seite die Prozess-Wärmesenken.

Wenn die aktuelle Hilfsstoffbilanz auf diese Kurven gelegt wird, lässt sich klar erkennen, wo das Potenzial für die Verbesserung des Hilfsstoffeinsatzes liegt. Beispielsweise weist in Abbildung A 4 (A) der vorhandene Abstand zwischen der

Prozesskurve (grau) und der Hilfsstoffkurve (rot) darauf hin, dass Potenzial vorhanden ist, um zusätzlichen Hochdruckdampf (HD) aus der Prozesswärme zu erzeugen. Aus den Wärmesenkenkurven ist ersichtlich, dass ein Großteil des bisherigen Mitteldruckdampf(MD)-Verbrauchs auf Niederdruckdampf(ND) umgestellt werden kann.

Abbildung A 4 (B) zeigt das optimierte Hilfsstoffprofil für das gleiche Beispiel. In diesem Beispiel

hat sich der Gesamtwärmebedarf nicht verändert und auch die Wärmeanforderungen an das Heizsystem sind die gleichen wie zuvor. Auf der Quellenseite der Prozesse zeigt die Abbildung jedoch ein zusätzliches Potenzial für die Dampferzeugung, das die Wärmeintegration der Prozesse effektiv erhöhen kann. Die Integration müsste in diesem Fall also indirekt über das Versorgungssystem erfolgen.

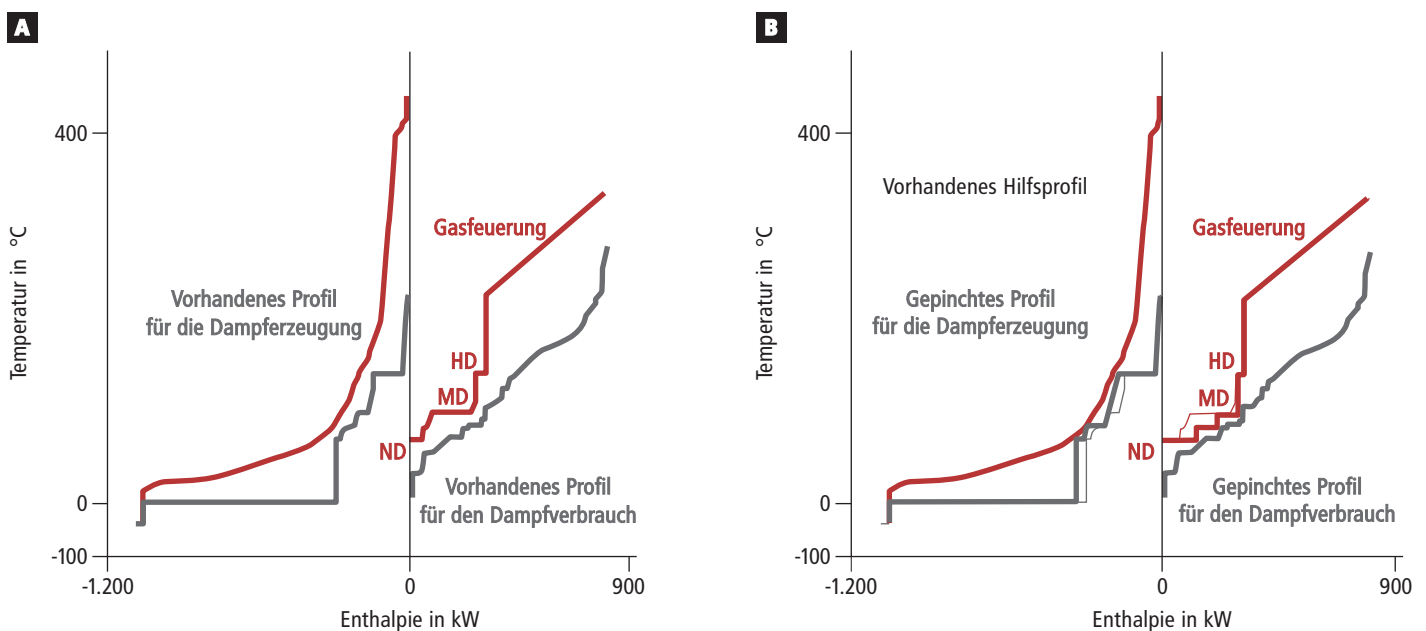


Abb. A 4: Standortweite Quellen-Senken-Profile

A 3 Methodik des Wasser-Pinch

A 3.1 Ausgangssituation

Der Wasser-Pinch hat das Ziel, die Wiederverwendung von Abwasser zu erhöhen, um damit sowohl Wasserverbrauch wie auch das Abwasseraufkommen zu senken. Für die Prozessindustrie, die oft hohe Wassermengen benötigt, ist dies insbesondere wegen neuer gesetzlicher Anforderungen an Abwassereinleiter, steigenden Wasserpreisen und Abwassergebühren von besonderem Interesse.

Die Wiederverwendung von Wasser ist aber – ähnlich wie die Wärmerückgewinnung – an gewisse qualitative Voraussetzungen (Reinheits-

grad, Schadstofffreiheit etc.) gebunden. Da dabei mehrere Parameter gleichzeitig betrachtet und optimiert werden müssen, stützt sich die Methodik des Wasser-Pinchs auf speziell entwickelte Algorithmen. Sie ermöglichen es, Wassernetzwerke systematisch zu analysieren und so die besten Maßnahmen zur Wasserwiederverwendung, -regeneration und -aufbereitung und damit auch zur Reduktion der Wasserkosten zu finden.

Der Wasser-Pinch lässt sich auf nahezu jedes Brauchwassersystem anwenden, bei dem es Frischwasserverbraucher und Abwassererzeuger gibt. Dies gilt für komplexe Wassersysteme

ebenso wie für kleine. Unterliegt das System allerdings zu vielen technischen Einschränkungen, besteht meist nur noch ein geringes Potenzial mit dieser Technologie Möglichkeiten zur Wassereinsparung

Analog zum Wärme-Pinch wendet der Wasser-Pinch Techniken der Prozessintegration an, um Wasser einzusparen und Abwassermengen zu reduzieren.

Bei der Wasser-Pinch-Analyse kommen daher viele Hilfsmittel zum Einsatz, die bereits von der Energieanalyse bekannt sind. Abbildung A 5 zeigt die Composite-Kurven für einen einzelnen Schadstoff. Sie kennzeichnen Wasserquellen und Wassersenken. Während beim Energie-Pinch auf der senkrechten Achse die Temperatur abgebildet ist und auf der waagerechten die Wärmeleistung, stellt der Wasser-Pinch die Abhängigkeit von Wasserreinheit und Wasserdurchfluss dar. Die Quellen-Senken-Kurven werden daher auch als „Reinheitsprofile“ bezeichnet.

Der Bereich, in dem sich Quellenkurve und Senkenkurve überdecken, gibt das Potenzial für die Wasserwiederverwendung an. Er wird durch den Pinch-Punkt begrenzt, an dem sich die beiden

„Reinheitsprofile“ bezeichnet.

Im Prinzip müssen für jeden Schadstoff Reinheitsprofile wie das oben dargestellte erstellt werden. Für jeden gibt es dann einen Entwurf, der ein Optimum erreicht. Diese Optima treten aber bei unterschiedlichen Auslegungen des Wassersystems auf, so dass die Entwürfe in eine für alle Abwasserschadstoffe geeignete Matrix

Industriezweig	Wassersparnis in Prozent
Erdölverarbeitung	25 bis 35
Chemikalien	30 bis 45
Papierherstellung	15 bis 25
Chemie- und Faserindustrie	20 bis 30
Polymere (Batch)	0 bis 60

Tab. A 2: Typische Anwendungen für den Wasser-Pinch und damit erzielte Einsparungen

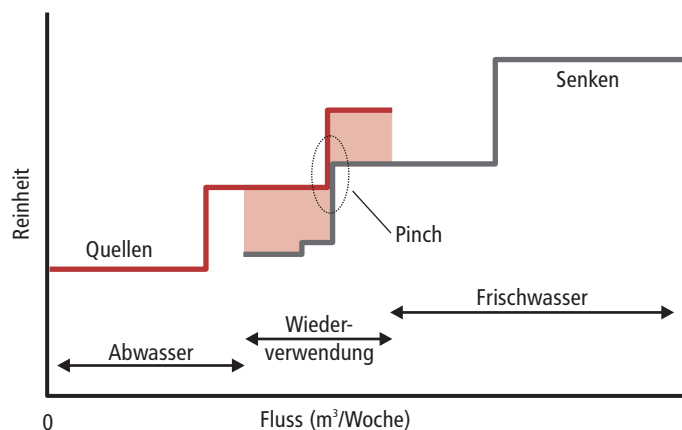


Abb. A 5: Reinheitsprofile

Kurven berühren. Die Bereiche rechts und links der Überdeckung der beiden Kurven zeigen den Frischwasserbedarf bzw. das Abwasseraufkommen an. Je stärker die Überdeckung, desto geringer sind diese. Dies entspricht dem Heiz- und Kühlmittelbedarf im Wärme-Pinch.

integriert werden müssen. In dieser Phase werden grafische Ansätze iterativ und aufwändig. Mithilfe von mathematischen Verfahren lassen sich die verschiedenen Profile aber kombinieren und ein Entwurf entwickeln, der den besten Kompromiss zwischen Wassereinsparung und Schadstoffminimierung darstellt.

Im Prinzip müssen für jeden Schadstoff Reinheitsprofile wie das oben dargestellte erstellt werden. Für

jeden gibt es dann einen Entwurf, der ein Optimum erreicht. Diese Optima treten aber bei unterschiedlichen Auslegungen des Wassersystems auf, so dass die Entwürfe in eine für alle Abwasserschadstoffe geeignete Matrix integriert werden müssen. In dieser Phase werden grafische Ansätze iterativ und aufwändig. Mithilfe von mathematischen Verfahren lassen sich die verschiedenen Profile aber kombinieren und ein Entwurf entwickeln, der den besten Kompromiss zwischen Wassereinsparung und Schadstoffminimierung darstellt.

6.3.4 Sensitivitätsanalyse

Die Schadstoff-Sensitivitätsanalyse ist ein ausgefeiltes Hilfsmittel der Wasser-Pinch-Technologie, das es erlaubt, mehrere Schadstoffe gleichzeitig zu betrachten. Während mit Composite-Kurven nur zwei Parameter wie beispielsweise Fluss und Konzentration erfasst werden, können hierbei eine Vielzahl von Schadstoffen gleichzeitig betrachtet werden. Die Sensitivitätsanalyse wird in der Regel mithilfe von Balkendiagrammen dargestellt. Sie zeigt die Bereiche auf, in denen sich durch Änderungen am Wassersystem die größ-

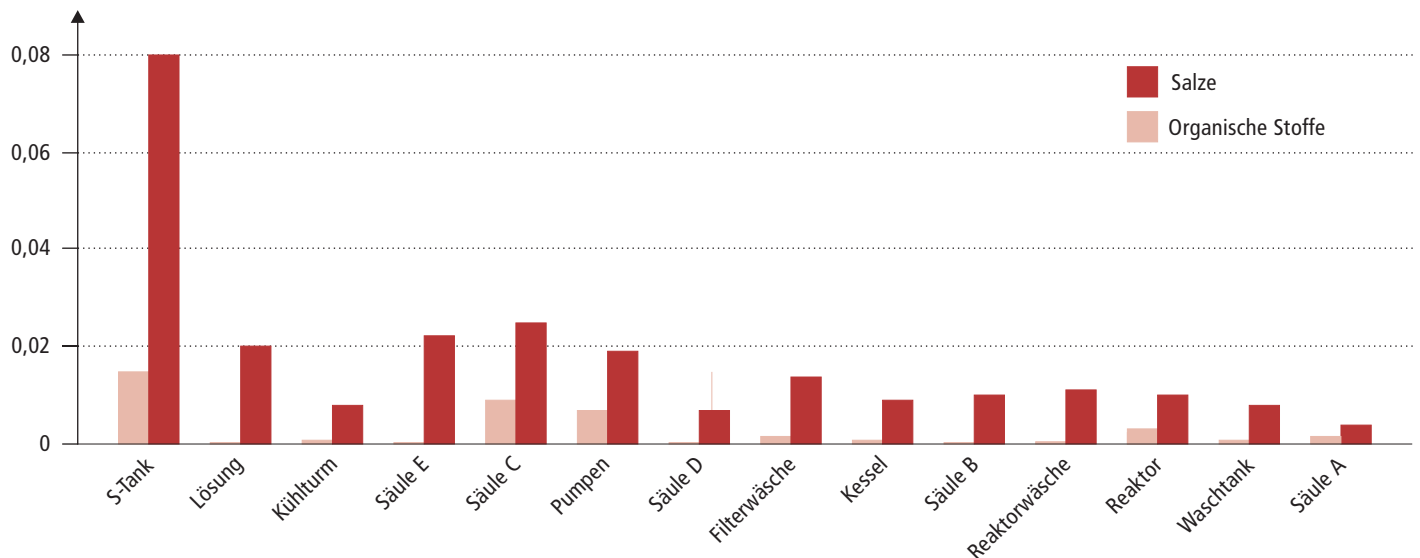


Abb. A 6: Sensitivitätsdiagramm Zulauf (Kosteneinsparung je Konzentrationsänderung)

A 3.5 Lösungsansätze

Die Wasser-Pinch-Analyse geht in der Regel davon aus, dass alle vorhandenen Konzentrationen nahe an den Maximalkonzentrationen liegen. Dadurch lassen sich normalerweise bereits eine Reihe brauchbarer Möglichkeiten für die Wiederverwendung ausfindig machen.

Die Sensitivitätsanalyse geht noch einen Schritt darüber hinaus: Sie identifiziert auch solche Maßnahmen, bei denen große Wassereinsparungen möglich werden, wenn für ausgewählte Senken die zulässigen Maximalkonzentrationen erhöht

werden. Dadurch lassen sich in der Regel noch größere Potenziale für die Wiederverwendung erkennen, als das beim reinen Wasser-Pinch der Fall ist (s. Abb. A 7).

Der nächste Schritt nach der Beurteilung der Wiederverwendungsmöglichkeiten besteht darin, das Potenzial zu bestimmen, das die vielen möglichen Kombinationen von Rückgewinnungs- und Wiederverwendungsmaßnahmen bieten (s. Abb. A 8).

Die Analysephase lässt sich in drei weitere Schritte unterteilen:

1. **Analyse bei gegebener Wasserqualität:**
 Dieser Analyseschritt betrifft den Ist-Zustand und geht davon aus, dass die Zulauf-Wasserqualität für einen Prozess unverändert bleibt. Die Analyse bei gegebener Wasserqualität ergibt den minimalen Wasserverbrauch, der bei den bestehenden Zulaufkonzentrationen erreichbar ist. Darauf aufbauend lassen sich Projekte entwerfen, die kostengünstig sind, weil sie nur Modifikationen der Rohrleitungen betreffen.
2. **Erkennen von Wiederverwendungsmöglichkeiten:**
 Dieser Analyseschritt untersucht, inwieweit sich Wasser wiederverwenden lässt, wenn die maximalen Schadstoffkonzentrationen im Zulauf gelockert werden. Sind die kritischen Verbraucher identifiziert, wird die maximal mögliche Senkung des Wasserverbrauchs berechnet. Dabei geht die Analyse davon aus, dass es möglich ist, die kritischen Verbraucher mit Wasser niedrigerer Reinheit zu versorgen. Aufbauend auf den Ergebnissen dieses Analyseschritts lassen sich Projekte entwerfen, die Veränderungen des Wassernetzwerks betreffen und auf Anpassungen der Rohrleitungen aufbauen.

2. **Feststellen der Wiedergewinnungs- und Aufbereitungsmöglichkeiten:**
 Ist die einfache Wiederverwendung von Wasser maximiert, gilt es im dritten Analyseschritt, die verbleibenden wesentlichen Abwasserströme zu untersuchen. Zuerst werden die Hauptströme ermittelt, die für eine mögliche Behandlung in einem Wiedergewinnungsprozess in Frage kommen. Dann können vorhandene oder neue Wasser- aufbereitungsanlagen hinsichtlich des allgemeinen Wasserverbrauchs und der Kosten für die Abwasser- aufbereitung bewertet werden. Die daraus abgeleiteten Projekte erfordern Investitionsausgaben für lokale Aufbereitungsverfahren.

Im letzten Schritt gilt es, die Möglichkeiten zu beurteilen, die sich für eine Aufbereitung von diversen Abwässern bieten. Anstatt alle Abwasserströme zu vermischen und sie in einer einzigen Aufbereitungsanlage zu behandeln, bietet sich beispielsweise an, sie zunächst getrennt aufzubereiten und erst dann mit anderen Strömen zu vermischen. In diesem Fall gelangen unverdünnte Abwasserströme in mehrere kleine Aufbereitungsanlagen zur Behandlung und nicht

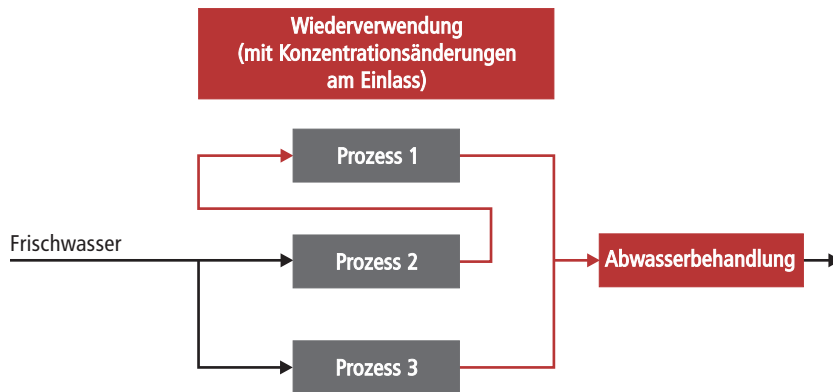


Abb. A 7: Wiederverwendung von Wasser

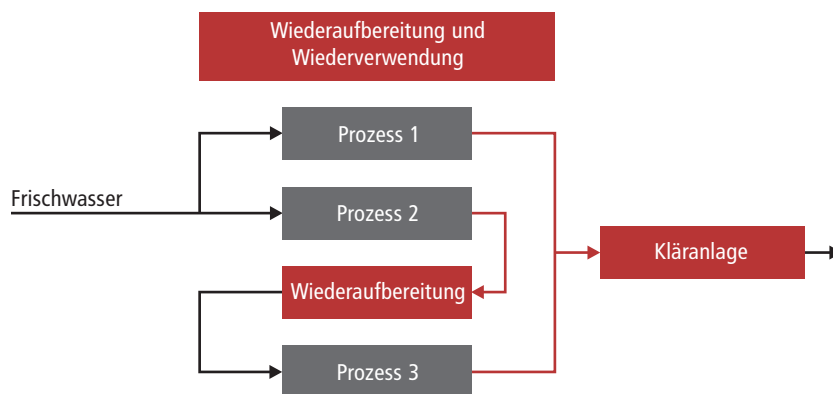


Abb A 8: Rückgewinnung und Wiederverwendung von Wasser

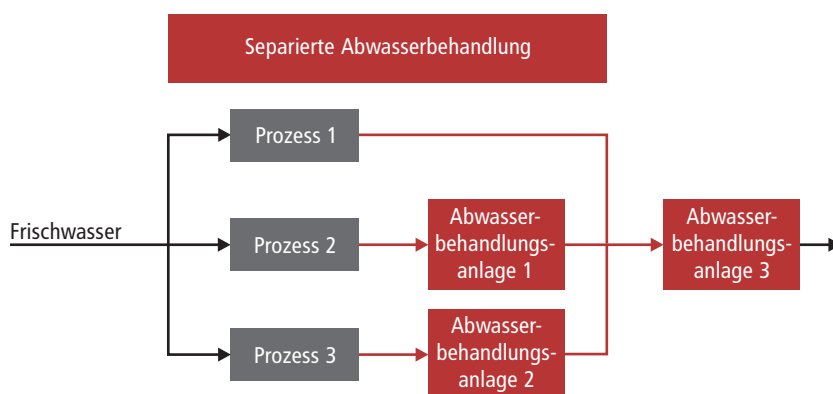


Abb. A 9: Aufbereitung von verteilten Abwässern

stark verdünnte Abwässer in eine große Anlage. Das resultierende System bietet unter Umständen eine effizientere Beseitigung von Schadstofffrachten zu niedrigeren Kosten (s. Abb. A 9).

A 3.6 Eine typische Wasser-Pinch-Studie

Eine typische Wasser-Pinch-Studie erfolgt in drei Phasen.

Phase 1: Aufstellen der Wasserbilanz

Voraussetzungen für jede Studie sind: eine abgestimmte Wasser- und Schadstoffbilanz und Informationen zu zukünftigen Plänen und Zielen für den Standort.

In Phase 1 gilt es:

- vorhandene Bilanzen zu überprüfen oder neue Bilanzen zu entwickeln,
- Widersprüche in den verfügbaren Daten zu erkennen und zu lösen sowie fehlende Messungen für Wasserströme und Schadstoffkonzentrationen durchzuführen,
- eine abgestimmte Wasser- und Schadstoffbilanz aufzustellen,
- eine Übersicht über die Abwasserstellen und die damit verbundenen Probleme und Hauptschadstoffe auszuarbeiten

Phase 2: Wasser-Pinch-Analyse

Das Ziel von Phase 2 besteht darin, das maximale Potenzial für Wassereinsparungen zu erkennen und Schlüsselbereiche für zukünftige Projekte hervorzuheben.

In Phase 2 gilt es:

- Ziele zu berechnen für den minimalen Wasserverbrauch und den Fluss zur Abwasseraufbereitung,
- eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen, um die kritischen Teile des Wassernetzwerks auffindig zu machen,
- vorbereitende Projekte zu ermitteln, die auf Basis eines quantifizierbaren Einsparpotenzials die Wiederverwendung von Wasser und die Aufbereitung separierter Abwässer ermöglichen,

- Möglichkeiten zur chemischen Aufbereitung zu bewerten,
- gegebenenfalls Daten für die Planung von Batch-Verfahren zu erheben

Phase 3: Konzeption der Projekte und Erstellung eines Entscheidungsplans

Das Ziel der Phase 3 besteht darin, die in den vorherigen Phasen identifizierten Projektideen vollständig zu bewerten und einen Entscheidungsplan für die Investitionsstrategie zu entwickeln, in der die alternativen Projektempfehlungen und die damit verbundenen Einsparungen aufgeführt sind.

In Phase 3 gilt es:

- Pakete mit Projektspezifikationen zu schnüren, inklusive Schemazeichnungen der vorgeschlagenen Änderungen und erwarteten Einsparungen,
- ein Konzept zu entwerfen – ohne detaillierte technische Daten wie Rohr- und Pumpenabmessungen – und eine Materialauswahl zu treffen,
- einen Entscheidungsplan zu entwickeln, der den erzielbaren Nutzen und die Kosten darstellt und so als Grundlage für die Investitionsplanung dienen kann (s. Abb. A 10).

**Entscheidungsplan
 Investitionsstrategie**

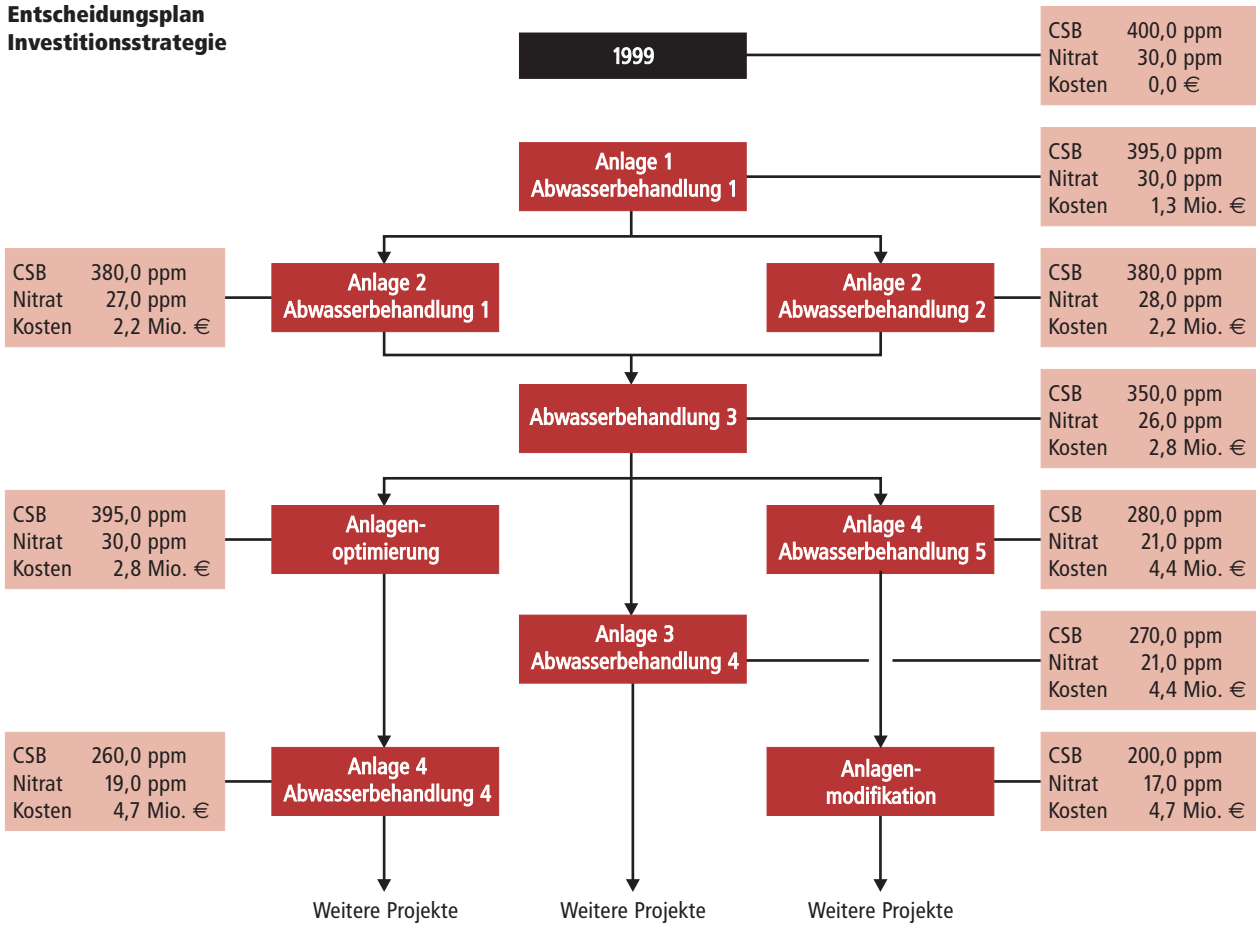


Abb. A 10: Beispiel eines Entscheidungsplans für die Investitionsstrategie für ein Wassersystem

Anhang B

Literatur und Software

B 1.1 Literatur

Kleemann, Gerhard:

Energieeinsparung durch optimale Energyrückgewinnung: (Anwendung der PINCH-Methode) / Prof. Dr.-Ing. Gerhard Kleemann. - Oldenburg: Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven, 2002. - 112 S. (PDF, ca. 1,9 MB) [http://spot.fho-emden.de/hp/kleemann/pinch_skript_02-10-16.pdf]

Leitfaden zur Anwendung der Pinch-Technologie für die Verbesserung der Energieeffizienz / Bodo Linnhoff u.a. - Bonn: Umweltbundesamt, 1996. (F&E-Vorhaben: 20407357)

Seider, Warren D.:

Process Design Principles: Synthesis, Analysis, and Evaluation / Warren D. Seider; J. D. Seader; Daniel R. Lewin. - New York: John Wiley & Sons, 1999. - 840 S. (mit CD-ROM v 2.0)

A Process Integration Primer / [Hrsg.:] International Energy Agency. - 3rd. and Final Version - Trondheim: SINTEF Energy Research, 2002. - 90 S. (Implementing Agreement on Process Integration; Annex I) [<http://www.tev.ntnu.no/iea/pi/Primer.pdf>]

B 1.2 Verwendete Software

Steam97™: The application calculates 30 thermodynamic and transport properties of water and steam. It allows 16 different combinations of input variables to be used for calculations. Input variables that can be used are: pressure, temperature, enthalpy, entropy, volume, internal energy and steam quality. [<http://www.megawatsoft.com/steam97.asp>]

WaterTracker™ verwendet verfügbare Daten, führt eine Datenabstimmung durch, erstellt eine Wasser- und Schadstoffbilanz und gibt insbesondere an, wo zusätzliche oder verbesserte Daten am nützlichsten wären. [<http://www.tetragenics.com/products/WaterTracker.htm>]

Radgen, Peter:

Möglichkeiten und Grenzen der Pinch-Analyse und der exergetischen Analyse zur Verbesserung und Optimierung industrieller Prozesse / Peter Radgen; Eva Schulz. In: VDI-Bericht; 1296. - Düsseldorf: VDI-Verl., 1997. - S. 69–90. s.a. [<http://www.abwaerme.ch/ABWdeutsch/Hilfen/Pinch/pinch.htm>]

Radgen, Peter:

How To Achieve Emission Reductions in Germany and the European Union: Energy Efficiency Workshop, September 18-26, 1999 / Peter Radgen. - Yokkaichi: Climate Technology Initiative (CTI)/ Karlsruhe: ISI, 1999. - 56 S. - (ISI-A-34-99). s.a. [http://www.isi.fhg.de/e/eng/staff/rg_e.htm]

Water-Pinch erstellt die Composite-Kurven für jeden Schadstoff und vermittelt dem Ingenieur einen ersten Eindruck von der Natur des Problems. Eine leistungsstarke mathematische Engine in der Software führt die Berechnungen für die Erstellung eines dreidimensionalen Sensitivitätsdiagramms durch. [<http://www.linnhoffmarch.com/software/watertarget/waterpinch.html>]

B 2 Abkürzungsverzeichnis

- C_p : spezifische Wärmekapazität in kJ/°C
- CP: Wärmekapazitätsstrom
- CSB:
- DT_{min} : kleinste zulässige Temperaturdifferenz zwischen heißem und kaltem Strom am Pinch
- ESSM: Energie und Stoffstrommanagement
- KWT: (S. 32, Abb. 6.8
- HD: Hochdruckdampf
- ND: Niederdruckdampf
- MD: Mitteldruckdampf
- T_{TFT} : theoretische Flammtemperatur
- $T_{shifted}$: verschobene Temperatur oder Intervalltemperatur bei der Konstruktion der Grand Composite-Kurve
- Q_{hmin} : minimaler Bedarf an heißen Hilfsenergien eines Prozesses
- Q_{cmin} : minimaler Bedarf an kalten Hilfsenergien eines Prozesses

(bitte nochmal überprüfen!)

B 3 Glossar

Composite-Kurven:

Grafische Darstellung eines Prozesses in einem Temperatur-Enthalpie-Diagramm. Sie dient dazu, maximale Potenziale für die Wärmerückgewinnung zu ermitteln (engl. composite: zusammengesetzt, Summen- ...).

ΔT_{min} :

Minimale zulässige Temperaturdifferenz für Wärmetauscher in einem Prozess. Sie bestimmt die größte Annäherung von heißem und kaltem Strom in der Composite-Kurven-Darstellung am Pinch. Analoge Darstellungen gibt es für Wasser- und Wasserstoffströme.

Energie-Optimum (Target):

Ein Schätzwert der Pinch-Analyse für den minimalen Energiebedarf in einem Prozess oder einer Anlage, der für ein vorgegebenes ΔT_{min} erreicht werden kann (engl. target: Ziel).

Energie- und Stoffstrommanagement

Ganzheitliche und systematische Betrachtung der betrieblichen Energie- und Stoffströmen.

Enthalpie:

Zustandsgröße, die den Wärmeinhalte eines physikalischen oder chemischen Systems bei konstantem Druck beschreibt.

Grand Composite-Kurve:

Darstellung eines Prozesses im Temperatur-Enthalpie-Diagramm. Sie stellt den Netto-Überschuss oder -Bedarf in Abhängigkeit von der Temperatur dar und erlaubt es, Verbrauchsdaten für die Hilfsenergien (Utilities) auf verschiedenen Niveaus zu ermitteln.

Heißer Strom:

Prozessstrom, der gekühlt werden muss.

Kalter Strom:

Prozessstrom, der erwärmt werden muss.

Pinch:

Punkt der größtmöglichen Annäherung zwischen heißem und kaltem Strom in einem Composite-Kurven-Diagramm. Er bestimmt das Energieoptimum der betrachteten Prozesse (engl. pinch: Engstelle, Engpass).

Pinch-Analyse:

Thermodynamische Analyse von verfahrenstechnischen Prozessen. Sie untersucht deren Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten und beruht auf der Auswertung einer Composite-Kurve.

Pinch-Technologie:

Methodologie auf Basis von Prinzipien der Pinch-Analyse. Sie zielt darauf ab, den Energieverbrauch in einem Prozess oder einem komplexen Prozesssystem durch geeignete Modifikationen des Wärmetauscher-Netzwerks, des Hilfsenergiesystems (Utility-System) und der Prozessbedingungen zu mindern.

Plus-Minus-Prinzip:

Thermodynamisches Prinzip, das anhand einer Composite-Kurve erlaubt, Prozessmodifikationen zu ermitteln, die geeignet sind, Energieeinsparungen herbeizuführen.

Prozessintegration:

Systematische und allgemeine Methoden zum Design von integrierten Produktionsanlagen – vom Einzelprozess bis zum Gesamtstandort. Eine besondere Betonung liegt dabei auf einer effizienten Energienutzung und dem Verringern von Umweltauswirkungen.

Prozessmodifikationen:

Veränderungen der Prozessbedingungen, die geeignet sind, weitergehende Energieeinsparungen zu ermöglichen.

Prozess-Pinch:

Pinch, verursacht durch Prozessströme.

Retrofit-Design:

Entwurf zur thermodynamischen Optimierung von vorhandenen Anlagen.

Total-Site-Profile oder Standort-Quellen-Senken-Profile (engl. site source sink profiles):

Grafische Darstellung der Wärme Flüsse im Werk als Funktion der Temperatur. Diese Darstellung ist sinnvoll, um Daten für Dampfverbrauch und -erzeugung, für die Drücke der Dampfhauptleitung und den minimalen Brennstoffverbrauch zu ermitteln (engl. site: Werk, Standort, Betrieb).

Total-Site-Targets:

Ein Schätzwert für Brennstoffeinsparungen und Potenziale zur Kraft-Wärme-Kopplung. Er wird mithilfe von Total-Site-Profilen und Dampf-System-Simulationen ermittelt.

Utility-Pinch:

Pinch, verursacht durch einen Utility-Strom (engl. utility: Hilfsenergieträger in Anlagen).

Wärme-Pinch:

Anwendung der Pinch-Technologie für die Optimierung von Wärmesystemen.

Wasser-Pinch:

Anwendung der Pinch-Technologie auf Wasser-/Abwassersysteme zur Optimierung der Wasserwiederverwendung.

Wärmetauschernetzwerk:

Ein System von Wärmetauschern, das mit Hilfsenergien oder Prozessströmen beheizt/gekühlt wird.

B 4 Weitere Informationen

B 4.1 Institutionen und Behörden

**International Energy Agency (IEA)
Implementing Agreement on Process Integration**
Homepage der von der IEA initiierten Kooperation zur Anwendung von Methoden der Prozessintegration unter
www.tev.ntnu.no/iea/pi/

Landesanstalt für Umweltschutz
Baden-Württemberg (LfU)
Postfach 21 07 52
D-76185 Karlsruhe
www.lfu.baden-wuerttemberg.de

B 4.2 Universitäten

Prof. Dr. Ing. Gerhard **Kleemann**
Fachhochschule Oldenburg/Ostfriesland/
Wilhelmshaven
Fachbereich Technik
Constantiaplatz 4
D-26723 Emden
Tel.: +49 (0) 1 80/56 78 07-15 19
Fax: +49 (0) 1 80/56 78 07-15 93
E-Mail: kleemann@nwt.fho-emden.de

Forschungsgebiet: u.a. Thermische Stofftrennung,
Wärmenutzung (Pinch-Technologie),

Prof. Dr.-Ing. Bernhard **Platzer**
Fachhochschule Kaiserslautern
Fachbereich Maschinenbau
Morlauerer Straße 31,
D-67657 Kaiserslautern
Tel.: +49 (0) 6 31/37 24-3 48
Fax: +49 (0) 6 31/37 24-1 05/-3 48
E-Mail: platzer@mach.fh-kl.de

Forschungsthemen:
Abwasserminimierung mittels Water-Pinch

B 4.3 Beratungsunternehmen

Linnhoff March Limited
Targeting House
Gadbrook Park
Northwich
Cheshire CW9 7UZ
United Kingdom
Tel.: +44 1606 815 100
www.linnhoffmarch.com

Dr. **Lorbach**
infraserv hoechst
Division Energien

Prof. Dr. Ing. Klaus **Lucas**
Wissenschaftlicher Direktor
Institut für Energie- und
Umwelttechnik e.V. (IUTA)
Abteilung Thermodynamik
Bliersheimer Straße 60
D-47229 Duisburg
Tel.: +49 (0) 20 65/4 18-2 16
E-Mail: lucas@iuta.de
www.iuta.de

Aspen Institute

Veröffentlichungen der LfU-Reihe „Industrie und Gewerbe“ (ISSN 0949-0485)

Titel	Band	Jahr der Herausgabe	Preis (falls lieferbar)
Regelwerke und beste verfügbare Techniken zur Luftreinhaltung sowie Einsatz von Abfällen in der Zementindustrie	1	1999	kostenlos
Entwicklung der Emissionen krebserzeugender Schadstoffe in Baden Württemberg auf der Basis der Emissionserklärungen für das Jahr 1996	2	2000	kostenlos
Betriebliche Energie- und Stoffstrom- managementsysteme: Methoden, Praxiserfahrungen, Software – eine Marktanalyse	3	2000	9 €
Blockheizkraftwerke: Technik, Ökologie, Ökonomie	4	2001	6 €
Holzhackschnitzel-Heizanlage	5	2001	9 €
Energie- und Stoffstromoptimierung in der betrieblichen Praxis der Lohnlackierung	6	2002	8 €
Mitverbrennung von Abfällen in Zement- und Kohlekraftwerken in Baden-Württemberg (Kurzfassung)	7	2003	kostenlos
Stoffströme in Druckereien optimieren	8	2003	8 €

Eigene Notizen und Anmerkungen:

(Leerseite)

(Umschlagseite 3)

