Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115 (1997)
Heft: 38

Artikel: Energieoptimierung und Kältekonzept
Autor: Krummenacher, Pierre / Morand, Raymond
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79305

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Pierre Krummenacher, Lausanne, und Raymond Morand, Zürich

Energieoptimierung und Kältekonzept

In einer Brauerei in Sion wurde eine Energiestudie unter Anwendung der Pinch-Methode durchgeführt und Energiesparmassnahmen sowie ein neues Kältekonzept erarbeitet. Die Datenaufnahme und eine erste energetische Analyse wurde durch die Ingenieurschule Wallis unter Begleitung der ETH Lausanne, der zweite Teil mit Massnahmen, Umsetzung und neuem Kältekonzept durch eine Ingenieurfirma ausgeführt.

Die Energiestudie in der Walliser Brauerei ergab Einsparmöglichkeiten von 25% der thermischen Energie (Gas), 15% der elektrischen Energie sowie 20% Frischwasser. Bei den vorgeschlagenen Massnahmen wird eine mittlere Payback-Zeit von unter drei Jahren erreicht, wobei die Optimierung des Würzekühlers sogar nach gut einem Jahr amortisiert sein wird. Im weiteren wurde ein neues Kältekonzept vorgeschlagen, welches auf der Zentralisierung der Prozesskälte inkl. Kältespeicherung sowie auf der Zusammenfassung der Kälteerzeugung für den Klimabereich beruht. Die Vorteile dieser Anordnung sind geringere Investitionen sowie höhere Flexibilität und Sicherheit im Produktionsprozess.

Problemstellung und Vorgehen

Anstoss zum Projekt gab die Erneuerung der Kälteanlagen, welche wegen ihres Alters zu ersetzen waren. Zusätzlich ergab die Analyse der Energiekennzahlen der Produktion vergleichsweise hohe Werte, so dass sich auch aus Kostengründen eine Optimierung aufdrängte. Zielsetzung des Projektes war eine energieeffiziente Produktion sowie die Konzeption einer neuen Kälteversorgung mit minimierten Betriebs- und Investitionskosten.

Mit der Datenaufnahme, der Analyse der ganzen Brauerei mittels Pinch-Methode sowie ersten Vorschlägen bezüglich der Kälteversorgung wurde die Ingenieurschule Wallis beauftragt (als Semester- und Diplomarbeit ausgeführt). Ausgehend von dieser Analyse wurde eine detaillierte Energieanalyse durchgeführt sowie ein neues Kältekonzept erstellt.

Gemäss dem sogenannten Zwiebelschalenmodell (Beitrag M. Zogg: «Einführung in die Prozessintegration») wurden nacheinander Massnahmen auf den Stufen Prozess, Wärmetauscher, Speicherung sowie Kälteversorgung erarbeitet, welche Heizenergie, Strom und Wasser einsparen. Im allgemeinen nimmt die Wirtschaftlichkeit in der «Zwiebel» von innen nach aussen ab, womit die inneren Massnahmen, wie beispielsweise eine direkte Verfahrensoptimierung, höhere Priorität erhalten. Als letzter Schritt wurde ein neues Kältekonzept erstellt, mit welchem die Kälteenergie kostengünstig zur Verfügung gestellt werden kann.

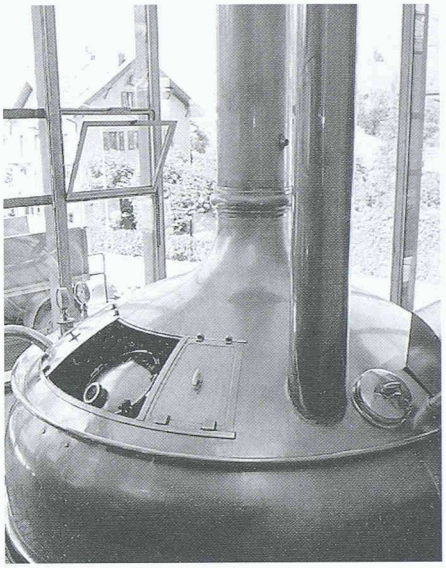
Energiesituation in der Brauerei

Die Sittener Brauerei produziert Lagerbier vor allem für regionale Abnehmer sowie Spezialbiere in teilweise kleineren Mengen für die ganze Schweiz. Die Bierproduktion betrug 1994/95 rund 65 000 hl/a, entsprechend 490 Suden.

Die heutigen Kosten (Bild 2) für die Bereitstellung der Wärmeenergie betragen gut Fr. 165 000.- p.a. Die Stromkosten erreichen etwa die gleiche Grössenordnung, wobei gut 40% allein für die Kälteerzeugung aufgewendet werden müssen. Die Wasserkosten liegen dank tiefer Wasserpreise nur bei gut Fr. 70 000.- p.a., wovon fast 50% für die Rückkühlung der Kältemaschinen aufgebracht werden müssen.

Bis heute existiert eine teilweise Wärmerückgewinnung über den Warmwasserspeicher, die aber nicht optimal betrieben wird.

Die bestehende Kälteversorgung ist «organisch» gewachsen, d.h., sie besteht aus diversen kleinen und dezentralen Einheiten für die Produktion und die Lagerung des Bieres. Es wurden bedeutende Unterschiede in den Leistungsziffern der einzelnen Kältemaschinen festgestellt.



1
Würzepfanne: Kern des Brauprozesses

Vom Malz zum Bier: die wesentlichsten Etappen

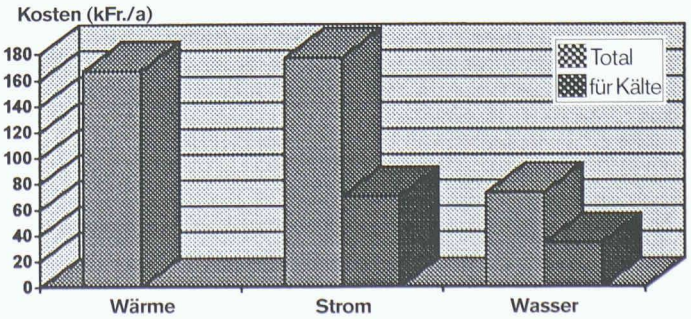
Der Bierherstellungsprozess ist in einem Verfahrensschema (Bild 3) dargestellt. Die Hauptschritte zur Bierherstellung sind die folgenden (die Nummern der Aufzählung entsprechen jenen im Schema):

- Maischeprozess (1)

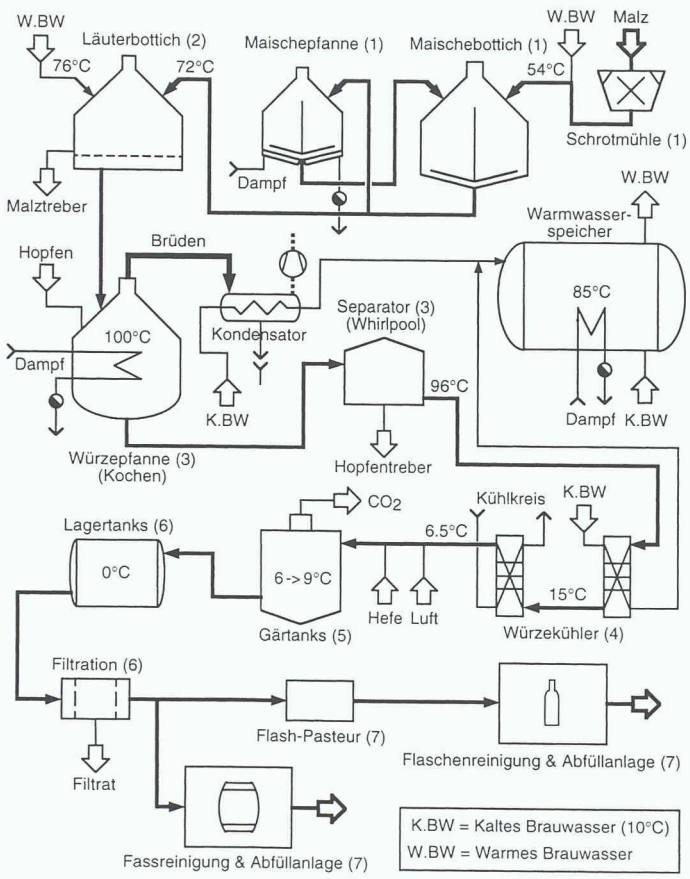
Das zerkleinerte Malz wird mit Warmwasser (54 °C) eingemaischt. Durch eine stufenweise Temperaturführung wird die Maische von 54 auf 72 °C erwärmt. Die Stärke wird durch die malzeigenen Enzyme bei 62 bis 72 °C zu Malzzucker abgebaut

- Abläuterung (2)

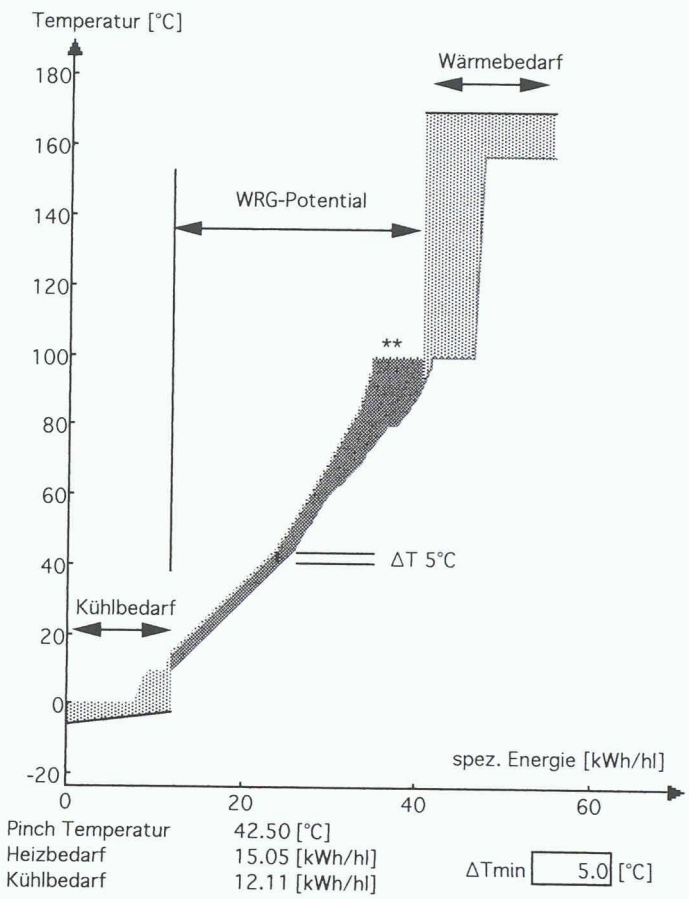
Die Maische wird im Läuterbottich von den unlöslichen Stoffen separiert, es entsteht die sogenannte Würze. Der zurückbleibende Filterkuchen wird anschliessend mit Wasser (76 °C) berieselt, damit der noch verbliebene Extrakt herausgelöst wird



2
Betriebsmittelkosten-Ist-Zustand



3
Bierherstellungsprozess



4
Verbundkurven des Brauprozesses

- Kochprozess (3)

Durch Kochen der Würze in der Würzepfanne wird 6,5% des Kocherinhalts verdampft, um den gewünschten Extraktgehalt zu erreichen und unerwünschte Komponenten auszudampfen. Während des Kochprozesses wird auch der Hopfen zugegeben

- Würzekühlung (4)

Die Würze wird nach dem Kochprozess in einem Wärmetauscher (Würzekühler) auf die Anfangsgärungstemperatur von rund 6 °C abgekühlt

- Gärung (5)

Die Würze wird unter Zugabe von Hefe während sieben Tagen vergoren. Bei der Umwandlung des Malzzuckers in Alkohol und CO_2 wird Wärme frei

- Lagerung (6)

Das entstandene Jungbier wird von 5 auf 0 °C abgekühlt, während vier Wochen bei 0 °C gelagert und anschliessend filtriert

- Abfüllung (7)

Das Bier wird in Flaschen oder Fässer abgefüllt

Datenerfassung – wichtigste Heiz- und Kühlanforderungen

Die ganze Bierproduktion, das Speichersystem sowie die Reinigungsanlagen wurden mittels Pinch-Methode untersucht und bezüglich der tatsächlichen Prozessanforderungen hinterfragt, so z.B. ob gewisse Prozesstemperaturen wirklich nötig sind oder gesenkt werden könnten. Die Temperaturen, Massen- und Energieflüsse wurden durch Messung im Betrieb sowie durch Berechnung bestimmt. Wichtige bestehende Komponenten wurden detailliert durchgemessen. Aus diesen Daten wurde eine Wärmebilanz erstellt.

Der Brauprozess benötigt den grössten Anteil der Wärme, indem die Maische von 10 auf 74 °C und die Würze von 74 auf 98 °C erwärmt werden muss und etwa 6,5% der Würze im Kochprozess verdampft wird. Er bietet aber auch grosse Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung (WRG) so z.B. durch Brüdenkondensation (Brüden = Dampf) beim Kochprozess (Würzepfanne, Bild 3) sowie durch Frischwasservorwärmung beim Würzekühler (Bild 3). Beide Abwärmequellen werden schon heute zur Vorwärmung von Brauwasser genutzt.

In Brauereien spielt die Warmwasserspeicherung (Bild 3) energetisch eine zentrale Rolle, so kann im optimierten Zustand ein Grossteil der Abwärme zur Vorwärmung von Frischwasser verwendet werden. Dieses vorgewärmte Frischwasser wird im Wärmespeicher gepuffert, um später der Produktion nach Bedarf zur Verfügung zu stehen.

Weitere bedeutende Wärmeverbraucher sind die Flaschen- und Fassreinigung sowie die CIP-Reinigungsanlagen im Sudhaus, wo ebenfalls WRG-Möglichkeiten vorhanden sind, die zurzeit jedoch noch ungenutzt bleiben.

Die Kühlung der Würze von 15 auf 6 °C, die Gärung (Reaktion mit Wärmeabgabe) sowie die anschliessende Lagerung des Bieres ergeben die Hauptkühlanforderungen (siehe auch Bild 3).

Analyse mit der Pinch-Methode

Das Diagramm (Bild 4) zeigt die energetischen Verbundkurven der ganzen Brauerei (diese Darstellung enthält alle energetischen Daten des Brauprozesses), woraus die Wärmerückgewinnungspotentiale sowie der Heiz- und Kühlbedarf des Ge-

samtprozesses ersichtlich sind. Bei einer vernünftigen Pinch-Temperaturdifferenz von 5 °C erhält man einen minimalen Heizbedarf von 15,0 kWh_{th}/hl Bier oder gut 70% Einsparung verglichen mit dem Ist-Zustand; allerdings sind in diesem Wert keine Verluste aus Wärmeerzeugung und -verteilung von heute rund 10 kWh_{th}/hl Bier enthalten.

Die zwei horizontalen Linien der Verbundkurven bei rund 100 °C stellen den Kochprozess dar. In diesem Bereich wird bei anderen Brauereien üblicherweise eine Brüdenkompression vorgeschlagen, was aber im vorliegenden Fall nicht sinnvoll ist. Dies, weil die Kurven auch nach «Anheben» der linksseitigen Horizontale** um 10 °C infolge einer Brüdenkompression nicht untereinander geschoben werden können, da zuwenig Abwärmequellen vorhanden sind. Es würde nur fossile Wärmeenergie durch Strom ersetzt ohne Erzielung von Gesamteinsparungen.

Im vorliegenden Projekt müssen die Verbesserungsmassnahmen in die bestehende Anlage bei gegebenen betrieblichen Vorraussetzungen und Rahmenbedingungen implementiert werden. Dies reduziert das wirtschaftlich realisierbare Einsparpotential an Wärme auf rund 35%.

Massnahmen

In den folgenden Bereichen wurden Massnahmen zur Energieoptimierung vorgeschlagen:

- Kondensator der Würzepfanne

Steigerung der Wärmerückgewinnung von heute unter 20 auf etwa 85% (nur die rentablen Massnahmen wurden vorgeschlagen) durch verbesserte Rohrleitungsführung, neuer Kühlwasserregelung und neuem Ventilator ergeben Einsparungen von rund Fr. 11 500.- pro Jahr bei einer Payback-Zeit der Massnahme von etwa 2,5 Jahren

- Würzekühler

Die Vergrösserung der Fläche des Plattenwärmetauschers und die Einstellung des optimalen Betriebszustandes erhöht die Wärmerückgewinnung um mehr als 60% (inkl. Verbesserung der Wasserbilanz mit dem Warmwasserspeicher) und ergibt eine Einsparung von rund Fr. 10 500.- pro Jahr bei einer Payback-Zeit der Massnahme von etwa 1,2 Jahren

- Fassreinigung

Eine umfassende Wärmerückgewinnung mittels Speicher inkl. Regelung sowie Plattenwärmetauscher ergibt Einsparungen von rund Fr. 11 500.- pro Jahr bei einer Payback-Zeit der Massnahme von etwa 3,5 Jahren

- Warmwasserspeicher

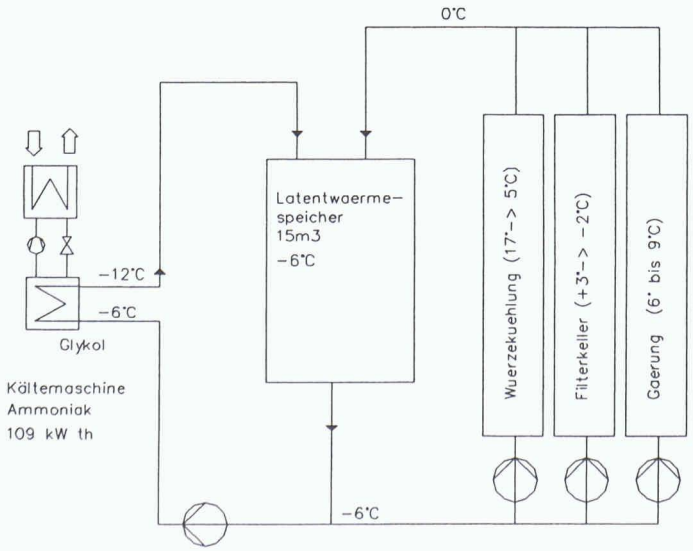
Durch Wiederinbetriebnahme eines höhergelegenen Tanks und entsprechende Verohrung wird das nutzbare Speichervolumen um 40% auf 100 m^3 erhöht. Ein neues Speichermanagement (mit Simulationsrechnung optimiert) und eine neue Niveauregelung verhindern das Überlaufen von aufgewärmtem Brauwasser. Zusammen mit einer Pumpenregelung sind Einsparungen von rund Fr. 6000.- pro Jahr möglich bei einer Payback-Zeit der Massnahme von etwa 8 Jahren

- CIP-Anlagen im Sudhaus (cleaning in place)

Die Verbesserung der Kreislaufschaltung erzielt eine Einsparung von rund Fr. 2000.– pro Jahr.

Alle obigen Massnahmen ausser bei CIP-Sudhaus haben zum Ziel, Abwärme aus dem Prozess zu nutzen, um kaltes Frischwasser vorzuwärmen, im Warmwassertank zu speichern und es anschliessend als vorgewärmtes Brauwasser in der Produktion weiter zu verwenden.

Ein Teil der vorgeschlagenen Massnahmen zur Energieoptimierung wurde bereits realisiert.



5 Prozesskälteerzeugung

Kältekonzept

Das neue Kältekonzept (Bild 5) beruht auf der Zusammenfassung der Kälteanlagen, die für die Prozesskühlung zuständig sind, sowie auf der Zentralisierung der Klimakälteanlagen, insbesondere der Lagerkeller.

Im Bereich Prozesskälte wurden kleine Kältekompressoren kombiniert mit einem Latentwärmespeichersystem vorgeschlagen, welches die zeitlichen Schwankungen (z.B. während der Würzekühlung) aufnimmt. Hauptvorteile dieser Anordnung sind tiefere Investitionskosten, eine höhere Flexibilität im Produktionsprozess sowie Kosteneinsparungen für Strom und Wasser. Die neue Kälteversorgung wird gemäss Studie umgesetzt.

Resultate

In der Tabelle (Bild 6) sind die wichtigsten Resultate des Projektes zusammengefasst. Der erreichte energetische Optimierungsgrad von 61% sagt aus, dass etwas weniger als zwei Drittel der realisierbaren Energieoptimierungen vorgenommen wurden. Er ist also ein Mass für das noch bestehende Optimierungspotential. Die weitere Verbesserung des Energieoptimierungsgrades wäre nur unter Inkaufnahme einer schlechteren Wirtschaftlichkeit möglich.

Durch die Massnahmen werden 25% Wärmeeinsparungen möglich, welche eine mittlere Payback-Zeit von drei Jahren, bei einzelnen Massnahmen sogar von rund einem Jahr, erreichen. Durch das neue Kältekonzept mit effizienterer Technologie und optimalen Temperaturverhältnissen können nochmals 15% Strom und 20% Wasser, d.h. mehr als Fr. 40 000.- pro Jahr eingespart werden. Durch Kombination der Massnahmen zur Energieoptimierung mit dem neuen Kältekonzept werden also mehr als Fr. 80 000.- pro Jahr an Betriebskosten eingespart.

Nutzen der Pinch-Methode

Um rasch die vielversprechendsten Wärmerückgewinnungs- und Prozessverbesserungsoptionen identifizieren zu können,

Neuer energetischer Optimierungsgrad* [%]	61
Massnahmen	
Wärmeenergieeinsparung [%]	25
Kosteneinsparung Fr. p.a.	42 000.-
mittlere Payback-Zeit [a]	3.0
Kältekonzept	
Stromeinsparung [%]	15
Wassereinsparung [%]	20
Kosteneinsparung Fr. p.a.	41 000.-

* Energetischer Optimierungsgrad nach Helbling [1]: Quotient der bestehenden Wärmerückgewinnung zur technisch-wirtschaftlich vertretbaren Wärmerückgewinnung

$$\eta = \frac{Q_{max} - Q_{ist}}{Q_{max} - Q_{opt}}$$

Q_{ist}: heutige Wärmeleistung [kW]
Q_{max}: Wärmeleistung [kW] ohne Wärmerückgewinnung (WRG)
Q_{opt}: Wärmeleistung mit optimaler WRG nach Pinch-Methode [kW]

6
Zusammenfassung der Resultate

braucht es neben Erfahrung und gesundem Menschenverstand vor allem die Systematik der Pinch-Methode. Mit Hilfe der Verbundkurven kann neben den energetischen Zielsetzungen (minimale Heiz- und Kühlleistungen, Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten) auch die optimale Temperatur des Warmwasserspeichers bestimmt werden. Dank der wichtigen Rolle als Träger der Abwärme und seiner guten Speicherbarkeit kann in diesem Projekt die energetische Prozessintegration (Wärmerückgewinnung) zum grossen Teil mit Wasser als Übertragermedium betrieben werden.

Trotz des diskontinuierlichen Charakters des Brauprozesses (Batch-Prozess) kann die Analyse in einem ersten Schritt mit gemittelten Verbundkurven durchgeführt werden, wie wenn es sich um einen kontinuierlichen Prozess handelte. Dieser Ansatz ist tauglich für globale Feststellungen zum Gesamtprozess. Die Warmwasserspeicherung erlaubt es, zusätzlich zeitliche Beschränkungen in der Wärmerückgewinnung aufzulösen, d.h., neben der Abwärmenutzung wird auch die Produktionsflexibilität erhöht. Nur muss die Speichergrösse so ausgelegt werden, dass alle Produktionssituationen inkl. An- und Abfahren beherrscht werden können.

Eine der Hauptaussagen der Analyse mit der Pinch-Methode bildete der energetische Optimierungsgrad der Anlage. Der Optimierungsgrad beziffert in einer Art energetischer Standortbestimmung die noch mögliche Energieoptimierung.

Durch die Systematik des Vorgehens inkl. Neudefinition der Prozessanforderungen mit der Pinch-Methode können völlig neue Lösungen gefunden werden. Quasi als Nebeneffekt werden betriebliche Nichtidealitäten entdeckt z.B. der Würzekühler, welcher mehrmals umgebaut wurde und nicht mehr innerhalb der optimalen Prozessbedingungen lief.

Der Erfolg in energetischer Hinsicht ist mit der Pinch-Methode sichergestellt. In finanzieller Hinsicht ist der Erfolg bei heutigen Energiebereitstellungskosten von den Gegebenheiten des einzelnen Betriebes insbesondere Anlagenauslastung und Energiekosten pro Wertschöpfungseinheit abhängig.

Adresse der Verfasser:
Raymond Morand, Dipl. Ing. ETH/SIA, Helbling Ingenieurunternehmung AG, 8048 Zürich; *Pierre Krummenacher*, Ing. EPFL/SIA, EPFL-Lab. d'énergétique industrielle, 1015 Lausanne

Bauherr
Feldschlösschen AG (Brasserie Valaisanne), *D. Bhend*, Dipl. Ing. ETH, *F. Stauffer*, Braumeister, 4310 Rheinfelden

Daniel Diggelmann und Raymond Morand, Zürich

Energieoptimierung in der Projektierungsphase

Im Rahmen eines Pilotprojektes unter Energie 2000 wurde die Produktionsanlage einer Papierfabrik im Bereich thermische Energie mittels der Pinch-Methode untersucht. Auslöser waren anstehende umfangreiche Sanierungsarbeiten an der Anlage und eine geplante Produktionssteigerung. Die Anwendung der systematischen Analyse-Methode zeigte ein wirtschaftlich interessantes Energieeinsparpotential von 13% auf. Die Einsparungen resultierten im Bereiche der Papiertrocknung, einerseits durch Änderungen am Dampf- und Kondensatsystem, anderseits durch die Optimierung der Wärmerückgewinnung/Abwärmenutzung, womit neu die Maschinenzuluft (110 °C) ohne externe Energiezufuhr vollständig aufgeheizt werden kann.

Mit der Realisierung der Sanierungsmassnahmen im Sommer 1995 wurde das Einsparpotential erschlossen, wobei die Payback-Zeiten durchwegs weniger als zwei Jahre betrugen. Die Studie zeigte auch, dass bei Anwendung der Pinch-Methode bereits in der Projektierungsphase von Anlagensanierungen (bzw. Neuanlagen) die Investitionskosten für die Realisierung der Einsparmassnahmen gesenkt werden können. Ebenfalls konnte der in der Papierindustrie verbreiteten Meinung entgegengetreten werden, dass eine wirtschaftliche Aufheizung der Maschinenluft mittels Abwärme nur bis zur Ausnutzung der Vakuumbrüden, d.h. bis rund 70 °C möglich ist.

Problemstellung

Das vorliegende Projekt war Teil des Programms Energie 2000, welches unter anderm die Anwendung neuer, wenig bekannter Technologien der effizienten Energienutzung in der Industrie fördert. Die Papierfabrik produziert jährlich rund 35 000 Tonnen hochwertiges, holzfreies Feinpapier für den grafischen Bereich sowie Spezialpapiere für Büro und EDV. Die Produktion erfolgt auf einer Papiermaschine, welche rund um die Uhr im Einsatz steht, d.h. mehr als 7500 Betriebsstunden pro Jahr erreicht. Im Sommer 1995 wurde die Produktionskapazität auf dieser Maschine erhöht. Damit verbunden waren umfangreiche Sanierungsarbeiten im Bereich der Papiertrocknung, auf welche der grösste Teil der jährlichen Energiekosten entfällt.

Aufgrund des Stellenwertes der Energie bei der Papierherstellung entschloss sich die Firma während der Projektierungsphase zusätzlich eine energetische Analyse durchzuführen. Deren Resultate sollten dann in die Lieferantenangebote einfliessen mit dem Ziel einer energieeffizienten Papierproduktion nach abgeschlossener Sanierung.

Bauherr
Ziegler Papier AG, *R. Thoma*, 4203 Grellingen