

Reduktion fossiler Energieverbräuche durch Prozessoptimierung mit Hilfe der Simulationsbetrachtung

M. Wiesinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

48/2010

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Reduktion fossiler Energieverbräuche durch Prozessoptimierung mit Hilfe der Simulationsbetrachtung

DI Dr. Hedda Weber (bis 30.9.2008),
DI Markus Wiesinger
Lenzing Aktiengesellschaft

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Anton Friedl
TU Wien, Inst. für Verfahrenstechnik,
Forschungsbereich 1662

Lenzing, Februar 2010

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT. Sie wurde 2003 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT soll durch Forschung und Technologieentwicklung die Gesamteffizienz von zukünftigen Energiesystemen deutlich verbessert und eine Basis zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energieträger geschaffen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und involvierten Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Mehrfache Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in ENERGIESYSTEME DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist, die Projektergebnisse – sei es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit leicht zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.ENERGIESYSTEMEderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Inhaltliche Darstellung.....	8
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	11
4	Ausblick.....	23
5	Literatur.....	24

1 Einleitung

1. Aufgabenstellung

Der betrachtete Prozess der Lenzing AG ist das Musterbeispiel eines Polygenerationszentrums auf Basis Holz (siehe Abbildung 1). Neben der Produktion von Zellstoff und dessen direkte Weiterverarbeitung zu Regeneratfasern werden zusätzlich eine Reihe von Feinchemikalien (Essigsäure, Xylose, Furfural, Ligno-sulfonat) für den Food und Non-food Sektor aus dem eingesetzten Buchenholz (Gesamteinsatz rund 600.000 Jahrestonnen) gewonnen. Der stofflich nicht weiter verwertbare Anteil der Biomasse dient der Energieerzeugung und ist die Basis für den hohen Grad der Eigenversorgung für Produktionsanlagen am Standort Lenzing. Neben Dampf auf mehreren Druckniveaus und kogeneriertem Strom wird Energie auch als Heißwasser, Vakuum, Kälte und Druckluft angeboten.

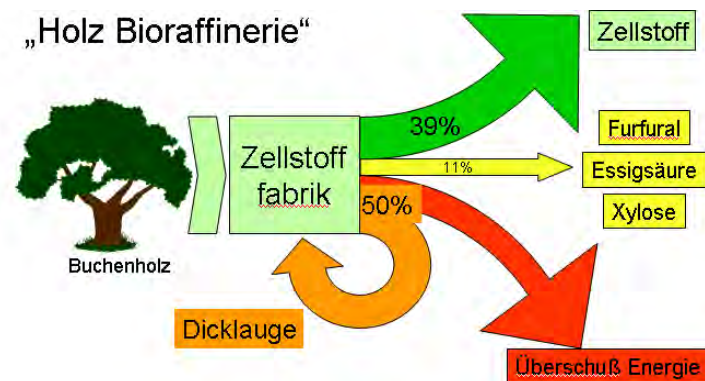


Abbildung 1 Polygenerationszentrum Lenzing AG

Durch die Nutzung zusätzlicher biogener und fossiler Energieträger werden in Lenzing fast 99% des gesamten Eigenbedarfes der LAG durch Produktion am Standort abgedeckt. Darüber hinaus werden auch eine Reihe von weiteren Unternehmen in Lenzing (Danisco, Evonik, Sintimid, SML, Lenzing Technik und Lenzing Plastics) mitversorgt. Im Jahr 2006 betrug die so erzeugte Energiemenge 12.506.727 GJ. Der dazu eingesetzte Brennstoffmix besteht aus ca. 83% biogenen und 17% fossilen Energieträgern. Nur etwas mehr als 1% der gesamten Energie wird als Fremdstrom bezogen. In vielen Teilbereichen sind schon kaskadische Energienutzungen installiert, so dass das betrachtete System bereits zu Beginn der Arbeiten hohe Energieeffizienz aufweist.

Dementsprechend weist das Energienetzwerk eine hohe Komplexität auf und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bereichen sind mit herkömmlichen Methoden schwer nachvollziehbar. Extrem unterschiedliche Nutzungsprofile der einzelnen Verbraucher haben enorm hohen Einfluss auf die Stabilität der einzelnen Subnetze und auf die Gesamteffizienz des Systems. Individuelle Energieeinsparungsmaßnahmen bewirken damit fallweise für das Gesamtsystem negative Effekte und ansteigenden Energieverbrauch. Prozesssimulation und computerunterstützte Optimierungsmaßnahmen sind in überschaubaren Energienetzwerken heutzutage Stand der Technik. In den einfachen Systemen liefern auch die mitgelieferten Standardoptimierungsmethoden brauchbare Ergebnisse. Allerdings stößt man in vielschichtigen, komplexen Netzwerken mit den herkömmlichen Methoden zur Energieeffizienzsteigerung zunehmend an die Grenzen und kann mit ihnen keine für die Praxis relevanten Ergebnisse erzielen. Dies liegt einerseits an der verwendeten Methodik, welche für einfache Prozesse entwickelt wurde, andererseits an einer Vielzahl von Parametern die neben den energetischen Belangen zusätzlich berücksichtigt werden müssen (Wirtschaftlichkeit der notwendigen Investitionskosten, Transportwege des Mediums etc.).

2. Schwerpunkte des Projekts

Ziel des vorliegenden Projekts ist die **energetische Optimierung** eines Industriestandortes anhand einer **zu entwickelnden, computergestützten Optimierungsmethodik**. Als Modellsystem dient dabei das reale, hochkomplexe Energienetzwerk mit Polygeneration der Lenzing AG. Mit dem vorliegenden Projekt soll das Potential der vorhandenen Energieströme voll ausgenutzt werden. Der Anteil der Energie, der in Form von Prozesswärme vorliegt, soll im Zuge dieses Projektes analysiert und ihre Ausnutzung optimiert werden.

Die Herausforderung in diesem Projekt liegt ganz klar in der hohen Komplexität des Systems, bei der eine Optimierung mit herkömmlichen Methoden nicht möglich ist. Aus diesem Grund ist ein wesentlicher

Bestandteil des Projektes die Entwicklung einer computerunterstützten Optimierungsmethode, die basierend auf den Betriebsdaten die Optimierungspotentiale des Systems ermittelt. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen werden in weiterer Folge realisierbare Umsetzungsprojekte zur Energieeffizienzsteigerung ausgearbeitet. Eine dadurch bedingte Reduktion des spezifischen Energieeinsatzes soll zur Reduktion von zugekauften fossilen Energieträgern genutzt werden. Das führt neben der Kostenreduktion auch zu einer Verbesserung der Umweltsituation (Einsparung von CO₂-Emissionen).

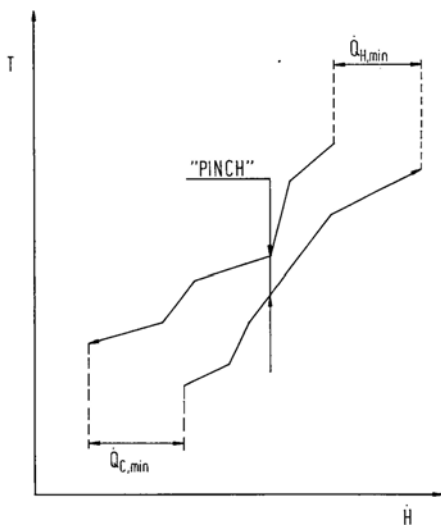
Im Zuge dieser Optimierung müssen viele Kriterien berücksichtigt werden:

- Einbeziehung von Schwankungen des Massenstroms bzw. der Wärmekapazität einzelner Ströme bei der Erstellung des Wärmetauschernetzwerkes.
- Kommen im untersuchten Prozess Ströme mit großen Temperaturänderungen vor, so können diese nur unter Verwendung spezieller Formulierungen exakt beschrieben werden
- Bei Unterteilung in Teilnetzwerke ist zu beachten, dass die Wahl der unabhängigen Subnetze das Ergebnis der Optimierung des Gesamtnetzwerkes beeinflusst
- Die Optimierung einer bestehenden Anlage erfordert andere Optimierungsmethoden als ein „Grüne Wiese“ Szenario.

3. Einordnung in das Programm

Energiesysteme der Zukunft

4. Verwendete Methoden



In einem ersten Schritt werden die **realen Prozessdaten ermittelt** und das betrachtete Modellsystem mittels Prozesssimulation abgebildet, um messtechnisch nicht zugängliche Daten zu berechnen. Anschließend wird auf Grundlage der ermittelten Daten die energetische Optimierung des Systems durchgeführt. Die optimale Ausnutzung der im Modellsystem vorhandenen Wärmeströme soll mit Hilfe der **Pinch-Analyse** und der anschließenden Entwicklung und Optimierung des Wärmetauschernetzwerkes erfolgen. Bei der Pinch-Analyse werden alle aufzuwärmenden und abzukühlenden Energieströme ermittelt und zu fiktiven heißen und kalten Gesamtströmen zusammengefasst. Diese Ströme können nun in einem Temperatur-Enthalpiestrom-Diagramm dargestellt werden, wie beispielhaft in der nachfolgenden Abbildung 3 gezeigt wird. Die Abbildung zeigt, dass es im System einen Punkt gibt, an dem der Ordinatenabstand zwischen dem abzukühlenden (linken) Gesamtstrom und dem aufzuheizenden (rechten) Gesamtstrom ein Minimum aufweist.

Dieser Punkt wird Pinch genannt und teilt den Prozess in zwei Teile auf: den Wärmesenken-Teil rechts vom Pinch und den Wärmequellen-Teil links vom Pinch.

Nachdem die Lage des Pinch-Punktes und die Lage der Kurven zueinander bestimmt sind, kann nun das erforderliche Wärmetauscher-Netzwerk ermittelt werden. Dabei können neben den allgemeinen Regeln für die Erstellung des Netzwerkes, wie beispielsweise Vermeidung des Wärmetausches zwischen Senkenseite und Quellenseite, verschiedene Optimierungsverfahren eingesetzt werden.

Es wurde folgende Methode angewendet:

Targeting: Mit Hilfe der aufbereiteten Stromdaten und der gewählten minimalen Temperaturdifferenz wird das Targeting für die Bereiche durchgeführt. Dabei wird ermittelt, welche Wärmeintegration zwischen den Prozessströmen maximal erreicht werden kann und wie groß der verbleibende Heiz- und Kühlbedarf im System ist. Liegt, wie im vorliegenden Fall, bereits ein reales Wärmetauschernetz vor, so kann durch Vergleich der ermittelten idealen Werte mit den realen Anlagewerten ermittelt werden, wie groß das Optimierungspotential der bestehenden Anlage ist.

Das Targeting kann sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung von Einschränkungen für den Wärmetausch zwischen den Prozessströmen durchgeführt werden. Dadurch kann aufgezeigt werden, wie viel Potential durch die Einschränkungen verloren geht. Fällt der Unterschied sehr groß aus, so kann eventuell eine Überarbeitung der Einschränkungen angedacht werden.

Ein weiteres Ergebnis dieses Optimierungsschrittes ist eine Auflistung der Wärmemengen, die zwischen den einzelnen Prozessströmen ausgetauscht werden müssten, um die maximale Wärmeintegration zu erhalten. Dieses Ergebnis sagt aber noch nichts über die tatsächliche Struktur des Wärmetauschernetzwerks aus.

HLD- Optimierung: Im anschließenden Arbeitsschritt, der HLD(= Heat Load Distribution)-Optimierung, wird eine gleichzeitige Optimierung des Heiz- und Kühlbedarfs sowie der Anzahl der benötigten Wärmetauscher durchgeführt, die zur Erreichung des optimalen Heiz- und Kühlbedarfs minimal erforderlich ist. In der verwendeten Optimierungssoftware gibt es in diesem Arbeitsschritt auch die Möglichkeit, verschiedene Ergebnisvarianten für ein eingegebenes System zu generieren. Dadurch wird ermöglicht, dass am Ende der Optimierung nicht nur ein mögliches Layout für das Wärmetauschernetzwerk vorliegt, sondern unterschiedliche Varianten, aus denen die geeignetste ausgewählt werden kann. Um die Ergebnisvielfalt zu erhöhen ist es jedoch empfehlenswert, darüber hinaus auch die Reihenfolge der eingegebenen Prozessströme zu variieren, um weitere Ergebnisvarianten zu generieren.

HEN- Optimierung: Anschließend kann die eigentliche Optimierung des Wärmetauschernetzwerks erfolgen. Dieser Schritt wird HEN(=Heat Exchanger Network)-Optimierung genannt. Für diese Optimierung stehen mehrere Optimierungsmodelle zur Verfügung:

Full Model: Optimiert das Netzwerk ausgehend von den eingegebenen Stromdaten. Die Berechnungszeit ist wesentlich höher als bei den anderen Modellen, da nicht bereits auf voroptimierte Daten zurückgegriffen wird. Dieses Modell sollte nur für sehr kleine Problemstellungen verwendet werden oder wenn für die Berechnung ausreichend Zeit zur Verfügung steht (die Berechnungsdauer kann mehrere Wochen dauern). Da die Berechnung nicht auf vorhergehenden Optimierungsschritten und damit verbundenen Einschränkungen basiert, kann das Ergebnis in einzelnen Fällen besser als bei den anderen Optimierungsvarianten ausfallen. Aus dem gleichen Grund kann es auch vorkommen, dass mit diesem Modell eine Lösung für die HLD-Optimierung gefunden wird, obwohl die beiden anderen Modelle kein Ergebnis liefern.

Vereinfachtes Modell basierend auf den Ergebnissen des Targetings: Bei dieser Variante werden die Ergebnisse des Targeting Schrittes herangezogen und darauf aufbauend die Optimierung durchgeführt. Konkret bedeutet das, dass für die HEN-Optimierung nur die Stromverknüpfungen herangezogen werden, die im Targeting Schritt ermittelt wurden. Dieses Modell benötigt weniger Rechenzeit als das Full Model, es liefert aber in vielen Fällen schlechtere Ergebnisse als das Modell, das auf den HLD Ergebnissen aufbaut. Liefert das nachfolgend beschriebene vereinfachte Modell basierend auf den HLD Ergebnissen keine Lösung, dann kann dieses Modell herangezogen werden, um eventuell doch ein Ergebnis bei annehmbarem Zeitaufwand zu erhalten.

Vereinfachtes Modell basierend auf den Ergebnissen der HLD-Optimierung: Dieses Modell baut auf den Ergebnissen, also den gefundenen Stromverknüpfungen, der HLD-Optimierung auf und stellt das schnellste der drei HEN-Optimierungsmodelle dar. Dieses Modell sollte in den meisten Fällen herangezogen werden, außer es handelt sich um Optimierungsaufgaben mit sehr wenigen Prozessströmen. In diesem Fall kann auch das Full Model herangezogen werden.

Bei der HEN-Optimierung muss festgelegt werden, mit wie vielen Stufen die Berechnung durchgeführt werden soll. Eine Stufe stellt dabei das Grundnetzwerk der Wärmetauscher. Dieses Grundnetzwerk wird entweder im Zuge der Optimierung erstellt (Full Model) oder aus den Ermittelten Stromverknüpfungen aus dem Targeting (vereinfachtes Modell basierend auf Targeting) bzw. der HLD-Optimierung (Vereinfachtes Modell basierend auf HLD-Optimierung) genommen. Vor Beginn der Optimierung kann dieses Grundnetzwerk zwischen den Strömen beliebig oft hintereinander angeordnet werden. Je öfter diese Superstruktur hintereinander angeordnet wird, d.h. je mehr Stufen für die Optimierung gewählt werden, umso besser kann das ermittelte Ergebnis werden. Grund dafür ist, dass mit jeder Stufe die Möglichkeiten erhöht werden, einen Strom in unterschiedlicher Reihenfolge mit anderen Strömen zu kombinieren. Allerdings steigt gleichzeitig mit jeder Stufe die Berechnungszeit an, da die Berechnung und Validierung dieser erhöhten Zahl an möglichen Verknüpfungen den Rechenaufwand erhöht.

Zusätzlich muss bei der Optimierung angegeben werden, auf wie viele Ströme ein Strom maximal gesplittet werden darf. Auch hier gilt wieder, dass sich mit steigender Anzahl an Splittströmen das Ergebnis verbessert aber gleichzeitig auch der Rechenaufwand steigt. Wird eine bereits bestehende Anlage optimiert, so sollte zumindest eine Variante berechnet werden, in der die Anzahl der Ströme, auf die gesplittet werden darf, die der real maximal auftretenden Anzahl an Splittströmen in diesem Bereich entspricht oder sie überschreitet. So kann ein Vergleich mit der Realität durchgeführt werden und eventuelle Fehler in den Eingabedaten oder Ähnliches leichter erkannt werden.

Retrofit: Die Ergebnisse der HEN-Optimierung können nicht ohne weiteres für eine Umsetzung des Netzwerks in die Realität herangezogen werden. Dafür gibt es mehrere Gründe:

Die gewählte minimale Temperaturdifferenz wird im Zuge der Optimierung für alle ermittelten Wärmetauscher herangezogen. Real kann für die Kombination zwischen unterschiedlichen Medien aber nicht immer die gleiche minimale Temperaturdifferenz herangezogen werden. So kann beispielsweise für den Wärmetausch zwischen zwei Flüssigströmen meist eine niedrigere minimale Temperaturdifferenz herangezogen werden als etwa für den Wärmetausch zwischen zwei gasförmigen Strömen. Daher kann die ermittelte Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern nicht in allen Fällen übernommen werden. Hier ist es also erforderlich, das ermittelte Wärmetauschernetzwerk mit realen minimalen Temperaturdifferenzen erneut zu berechnen.

Im Zuge der HEN-Optimierung werden auch Wärmetauscher ermittelt, die unrealistisch kleine Wärmemengen übertragen. Um diese unrealistischen Wärmetauscher zu entfernen, wurde in der verwendeten Software die Möglichkeit implementiert, eine Untergrenze für die übertragene Wärmemenge in einem Wärmetauscher anzugeben. Durch neuerliche Optimierung des ermittelten Wärmetauschernetzwerks unter Angabe dieser Untergrenze wird versucht, diese Wärmetauscher durch Änderung der Wärmemenge in anderen ermittelten Wärmetauschern zu ersetzen.

In manchen Fällen kann es gewünscht sein, die ermittelte Anzahl an Wärmetauschern zu verringern. Damit kann beispielsweise in gewissen Teilbereichen des Netzwerks eine Vereinfachung der Struktur erreicht werden. Auch diese Möglichkeit ist in der gewählten Software gegeben, indem alle Wärmetauscher ausgewählt werden, die angepasst werden sollen, und die gewünschte Anzahl an Wärmetauschern vorgegeben wird. Durch die anschließende Optimierung wird ermittelt, ob die gewünschte Wärmetauscheranzahl durch Änderung der ausgewählten Wärmetauscher erreicht werden kann oder nicht.

Wird ein bereits bestehendes Wärmetauschernetzwerk optimiert, so ist es unwahrscheinlich, dass das gesamte Netzwerk auf das in der Optimierung ermittelte optimale Netzwerk umgebaut werden kann. Es wird also erforderlich sein, aus den ermittelten Wärmetauscherverknüpfungen jene herauszufinden, die mit wenig Umbauten und damit niedrigen Kosten in das bestehende Netzwerk integriert werden können. Um das real erzielbare Potential zu ermitteln, muss daher das bestehende Wärmetauschernetzwerk aufgebaut werden. Anschließend werden die neu ermittelten Wärmetauscher in dieses Netzwerk integriert und dieses erweiterte Netzwerk optimiert. Zusätzlich wird es auch hier in einigen Fällen erforderlich sein, die minimale Temperaturdifferenz der neu ermittelten Wärmetauscher gegenüber der HEN-Optimierung anzupassen.

Wird eine Anlage mit verschiedenen Betriebsfällen untersucht (beispielsweise ein Sommer- und ein Winterbetrieb), so wird es erforderlich sein, ein für einen Betriebsfall ermitteltes und optimiertes Wärmetauschernetzwerk auch für die anderen Betriebsfälle zu evaluieren und das damit erzielbare Potential zu ermitteln.

Diese Anpassung des ideal ermittelten bzw. des realen Wärmetauschernetzwerks wird als Retrofit bezeichnet. Die Ergebnisse des Retrofits können anschließend weiter evaluiert und die Umsetzbarkeit der ermittelten Wärmetauscher unter ökonomischen Gesichtspunkten analysiert werden.

5. Aufbau der Arbeit

Die Arbeitsgruppe der TU Wien hat mit 1.10.2008 ihre Arbeit aufgenommen und sich anhand der Simex-Simulationen in die Daten der Lenzing AG eingearbeitet. Aufgrund der enormen Komplexität und der kaum überschaubaren Datenmenge erfolgte die Gliederung des Standorts in Teilbereiche. Der Abschnitt „Zellstoff-Fabrik und Energie I“ wurde als Referenzsystem gewählt, anhand dessen die Methodik entwickelt wurde. Entsprechend der Gliederung wurden für jeden Teilbereich getrennt, alle erfassten Ströme untersucht und auf Plausibilität sowie Relevanz für die Optimierung des Bereiches geprüft. Im Hinblick auf die Anwendung der Pinch Technologie bei der Optimierung der Bereiche erfolgte eine

Aufteilung der relevanten Energieströme in Prozessströme und Utilityströme (Heiz- und Kühlströme). Um keine Änderungen im Produktionsprozess der Anlage zu verursachen, sollten bei der späteren Optimierung die Prozessströme unverändert bleiben. Bei der nachfolgenden Optimierungsarbeit sind in einigen Fällen Änderungen in der Stromauswahl erforderlich geworden, was ein teilweise Wiederholen der vorhergehenden Arbeitsschritte erzwang.

Gleichzeitig zur Analyse hat die Gruppe von Prof. Jezowski das HEN-Tool in eine englische Fassung übersetzen und gemeinsam mit der TU Wien die Adaptierungen der Software vorgenommen. Im Zuge dieser Arbeiten hat die Gruppe von Prof. Jezowski beschlossen das HEN Tool von Grund auf neu zu programmieren.

Nach Abschluss der wichtigsten Adaptierungen hat die TU Wien begonnen die fertig gestellten Teile der Software am Referenzsystem zu testen. Die parallel zur Datenaufbereitung laufende Programmentwicklung und Verbesserungen gestattete uns bereits im Jänner ein erstes Targeting für den Referenzbereich durchzuführen. Das Targeting, der Schritt vor der eigentlichen Optimierung, wurde nun für alle anderen Bereiche durchgeführt. Bereits die Überprüfung der Analysenergebnisse nach den so genannten Pinch-Regeln zeigte Wärmeströme auf, die nicht optimal im Netzwerk genutzt wurden. Im Zuge der Diskussionen der Analysenergebnisse für den Bereich Zellstoff und Energie I wurde festgestellt, dass seit der Datenaufnahme erhebliche Umbauten und Prozessänderungen stattgefunden hatten. Auch sind für das Jahr 2010 große Änderungen in der Prozessführung (Umbau der Zellstoffbleiche auf ein neues Konzept sowie die Inbetriebnahme eines neuen Kessels) beschlossen und die finanziellen Mittel vom Vorstand der Lenzing AG freigegeben worden. Daher haben wir für diesen Bereich nur einige wenige Optimierungsrechnungen durchgeführt und uns intensiver der Optimierung der restlichen Bereiche zugewandt.

Zuerst wurden bei der Optimierung alle Stromkombinationen zugelassen, unabhängig von den räumlichen Gegebenheiten, den technischen und den sicherheitstechnischen Beschränkungen. Die Ergebnisse unterschieden sich stark vom real vorhandenen Wärmetauschernetz. Auch zeigten sich völlig andere Verschaltungen im Winterbetrieb als im Sommerbetrieb. Viele Stromkombinationen und Verschaltungsvarianten waren zudem technisch nicht umsetzbar.

Für den Bereich Viskose haben wir erstmals die Stromauswahl eingeschränkt, wodurch grundsätzlich ähnliche optimale Wärmetauschernetzwerke gefunden wurden. Auch unterschieden sich die Netzwerke im Sommer wenig von jenen im Winter. Gemeinsam mit den Fachleuten der Produktion schränkten wir in zeitaufwendiger Kleinarbeit die Stromkombinationen ein. Dies erfolgte nach verfahrenstechnischen Kriterien, sicherheitstechnischen Kriterien aber auch unter Berücksichtigung der örtlichen Lage der Stoffströme. Damit gelang es praxistaugliche Ergebnisse zu erhalten. Gleichzeitig sank erwartungsgemäß das Energiesparpotential. In der Regel ergab sich durch die Einschränkung eine überschaubare Anzahl von realistischen Verbesserungsvorschlägen für die Produktionsbereiche.

Diese verbleibenden Vorschläge wurden erneut aus betriebstechnischer Sicht geprüft, wobei einige Ansätze wieder verworfen werden mussten, weil sie z.B. sicherheitstechnisch bedenklich waren, wie etwa die Wärmerückgewinnung aus leicht entzündbaren und giftigen Schwefelkohlenstoffdämpfen. Letztendlich blieben vier Schwerpunkte übrig, die teils noch während des Projektes auf Wirtschaftlichkeit geprüft wurden und teils nach diesem Projekt weiter verfolgt werden. Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses wurde bereits die Umsetzung einer Maßnahme beschlossen, die 4380 GJ/Jahr Energie in der Form von 4 bar Dampf einspart.

2 Inhaltliche Darstellung

AP 1: Datenerfassung (Erhebung des Ist-Zustandes, Ausblick auf zukünftige Ausbaupläne, Datenbereitstellung)

Der Ist-Zustand wurde für alle Bereiche erhoben und in der vernetzten Simex-Simulationen abgebildet. Wie die Analyse der Flowsheets ergeben hat, bedürfen die Bereiche Rückgewinnung und Faserproduktion einiger Anpassungen und Feinabstimmungen, die zu einer Abweichung vom Terminplan geführt haben. Der Abschluss dieser Nachbesserungen ist bis Ende März umgesetzt worden. Diese Verzögerung von zwei Monaten wirkte sich nicht auf den Projektabschlussstermin aus. Ebenso wurden im vorherigen Projektabschnitt die Ausbaupläne erhoben. Diese Änderungen wurden soweit wie möglich bei der Optimierung berücksichtigt. Im Bereich der Zellstoffproduktion ergaben sich in den letzten Monaten erneut sehr wesentliche Änderungen was letztendlich dazu führte, dass wir diesen Bereich nicht weiter optimierten. Zur Datenerhebung hat die TU Wien Anfang Oktober 2008 die Simulationssoftware SimeX erhalten und damit auch den Zugang zu den für die weitere Optimierung benötigten Daten. Die Stromdaten (Massenströme, Temperaturen, Wärmekapazitäten, Enthalpien der Phasenänderungen) der berücksichtigten Ströme wurden in diesem Arbeitsschritt für die Optimierung vorbereitet. Dabei wurden folgende Punkte besonders berücksichtigt:

- Berechnung der mittleren Wärmekapazität eines Stromes zwischen Anfangs- und Endzustand eines Wärmetauschs.
- Unterteilung von Strömen mit Phasenwechseln in drei Teilbereiche: Abkühlung bzw. Aufheizung bis zum Phasenwechsel, Phasenwechsel und Abkühlung bzw. Aufheizung nach dem Phasenwechsel. Für die Bereiche vor und nach dem Phasenwechsel werden wieder mittlere Wärmekapazitäten ermittelt. Für den Phasenwechsel selbst wird anstelle der Wärmekapazität die Enthalpie des Phasenwechsels berücksichtigt. Für einen Phasenwechsel bei konstanter Temperatur (z.B. bei H₂O) wird als Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Phasenwechsels 1°C festgelegt, um mathematischen Instabilitäten zu vermeiden. Diese Vorgehensweise der Unterteilung von Strömen mit Phasenwechsel verhindert eine falsche Implementierung des Temperatur-Enthalpie-Zusammenhangs im Zuge der Optimierung.
- Möglichst vereinfachte Berücksichtigung von bestehenden Wärmetauscherver-schaltungen, d.h. wird ein Prozessstrom durch Wärmetausch mit mehreren anderen Strömen aufgeheizt oder abgekühlt, so dürfen nur der Anfangs- und Endzustand des gesamten Wärmetauschs berücksichtigt werden, aber nicht die dazwischen liegenden Zustände am Austritt der einzelnen Wärmetauscher..

AP 2: Gliederung des Produktionsprozesses

Bei derart großen und komplexen Anlagen, wie sie am Standort der Lenzing AG in Lenzing vorliegt, war es erforderlich, die Anlage in kleinere Teilbereiche zu unterteilen. Die Unterteilung wurde dabei so durchgeführt, dass möglichst wenige prozesstechnische und energetische Abhängigkeiten zwischen den Teilbereichen vorliegen, um die einzelnen Bereiche möglichst unabhängig optimieren zu können.

Die Teilbereiche sind:

- Zellstoff-Fabrik mit Energie II
- Energie I
- BKE (Brüdenkondensatextraktion)
- Viskoseproduktion
- Faserproduktion mit Rückgewinnung

Neben der Optimierung der Teilbereiche war jedoch auch eine zusätzliche Optimierung der Gesamtanlage anzustreben, um eine mögliche Wärmeintegration sehr energiereicher Ströme über die Bereichsgrenzen hinweg mitzubetrachten.

Für die Anpassung der Optimierungs-Software und die Entwicklung der Optimierungs-Methode war es wichtig, einen möglichst repräsentativen aber nicht zu komplexen Teilprozess zugrunde zu legen. Der Bereich „Zellstoff-Fabrik mit Energie II“ wurde als Referenzprozess festgelegt, weil er aufgrund seiner unterschiedlichsten Unit-Operations und verfahrenstechnischen Prozesse bei begrenzter Komplexität das für die Software- und Methodenentwicklung beste Testsystem darstellt.

Als erster Schritt wurden alle in der Simex-Simulation vorhandenen Massen- und Energieströme erfasst. Jene Ströme, die aus Simulationsgründen eingeführt wurden, fanden keine Berücksichtigung in der Optimierung. Die Festlegung der zu berücksichtigenden Energieströme erfolgt sukzessive im Wechsel mit der Analyse der zu berücksichtigenden Ströme (AP3).

AP 3: Studie der Energieströme

Jeder Teilbereich musste zunächst hinsichtlich der energierelevanten Ströme untersucht werden. Dabei wurde festgelegt, welche Ströme in die Optimierung mit aufgenommen werden und welche aus diversen Gründen (beispielsweise zu geringe Energiemenge, zu starke Schwankungen, nicht optimierbar, ...) ausgeklammert werden. In diesem Schritt erfolgte auch die Festlegung der Ströme als Prozessströme oder als Utilityströme (= Heiz- und Kühlmedien). Weiters wurde abgeklärt, welche Ströme kontinuierlich und welche batchweise anfallen, um diese Gegebenheiten bei der Optimierung und Interpretation der Ergebnisse berücksichtigen zu können. Es wurde darauf geachtet, dass nicht nur prozessbedingte Wärmetauscher, Kondensatoren, Verdampfer udgl. mitberücksichtigt werden, sondern auch Ströme, die prozesstechnisch keinen Wärmetausch erfordern, aber eine weitere energetische Nutzung erlauben. Dazu zählen etwa Abluftströme, die vor dem Austritt an die Umgebung noch weiter abgekühlt werden können als es sich durch den Prozess ergibt. Wichtiger Bestandteil dieses Arbeitsschrittes war auch die Festlegung, zwischen welchen Prozessströmen ein Wärmetausch möglich ist und zwischen welchen er, beispielsweise aus sicherheitstechnischen Gründen oder aufgrund zu großer Entfernungen, nicht erlaubt ist.

Dieser Schritt der Analyse der energierelevanten Ströme stellte sich als entscheidend für den Erfolg der Optimierung heraus, daher musste diesem Arbeitsschritt wiederholt Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Eine wichtige Randbedingung, die minimale Temperaturdifferenz am Pinch-Punkt wurde bereits mit 10°C festgelegt. Sie diente als Grundlage für das Targeting. Wird ein reales Wärmetauschernetzwerk optimiert, so ist die minimale Temperaturdifferenz an die realen Wärmetauscher anzupassen. Hier kann entweder die in diesem Bereich absolut niedrigste Temperaturdifferenz eingesetzt werden, womit das Optimierungspotential jedoch sehr überschätzt werden kann oder es wird die niedrigste Temperaturdifferenz innerhalb der Wärmetauscher mit der höchsten übertragenen Wärmemenge gewählt. Real war es oft erforderlich, mehrere Temperaturdifferenzen auszutesten, um den Wert zu finden, mit dem das System weder zu stark über- noch unterschätzt wird. Die Optimierung bei verschiedenen Temperaturdifferenzen zeigte sich später im Zuge der Optimierung des Bereichs RGS als unbedingt notwendig (siehe Ergebnisse)

AP 4: Auswahl und Anpassung des Optimierungstools

Seit Oktober 2008 wurde von der Gruppe um Prof. Jezowski das HEN-Tool, welches schon im ersten Berichtszeitraum ausgewählt wurde, in eine englische Fassung übersetzt und gemeinsam mit der TU Wien die Adaptierungen der Software vorgenommen. Im Zuge dieser Arbeiten hat die Gruppe von Prof. Jezowski beschlossen, das HEN Tool von Grund auf neu zu programmieren, da die ursprüngliche Programmumgebung nicht geeignet war, um alle geforderten Änderungen zu implementieren. Als Name für die neu entwickelte Software wurde die Bezeichnung „RETHEN“ gewählt. Bereits Ende Dezember 2008 / Anfang Jänner 2009 wurde der erste Teil der Software an die TU Wien übergeben. Im Zuge der Übergabe erfolgte auch eine Einschulung in die Software. Die Gruppe von Prof. Jezowski arbeitete anschließend an der Entwicklung des Tools zur Optimierung von Wärmetauschernetzwerken. Nach Abschluss der wichtigsten Adaptierungen und der Übergabe der Software hat die TU Wien begonnen, die fertig gestellten Teile der Software am Referenzsystem zu testen. Im Folgenden fanden Adaptierungen und Fehlerbehebungen statt. Ein Manual wurde erstellt und übergeben.

Die entwickelte Software steht jetzt der Lenzing AG zum weiteren Gebrauch zur Verfügung.

AP 5: Optimierung der Teilprozesse

Im AP 5.1 entwickelten wir die Methode der Optimierung. Sie wurde im AP 5.2 am Referenzsystem geprüft, leicht modifiziert, und im AP 5.3 auf alle Teilsysteme angewendet. Dieser Prozess war von Diskussionen der Zwischenergebnisse mit den Betriebsleitern und deren Team begleitet. Von der grundsätzlichen Methode, wie sie unten beschrieben wird abweichend, waren in einigen Teilbereichen besondere Aspekte zu berücksichtigen. Der Übersicht halber, werden diese bei den Ergebnissen besonders hervorgehoben.

Zusammenfassend wurden die Ergebnisse den Bereichsleitern präsentiert. Lenzing intern erfolgten mehrere Anlagenbegehungen und erste Gespräche zur Umsetzung. Die letztendlich geringe Anzahl an realisierbaren Einsparungspotentialen erübrigte einen aufwendigen Priorisierungsprozess.

AP 6: Optimierung des Gesamtprozesses

Ursprünglich war eine Betrachtung des gesamten Anlagenstandortes in Lenzing geplant. Aufgrund der Tatsache, dass derzeit viele Umbauarbeiten in den Bereichen Zellstoffproduktion, Energie 1, Energie 2 und BKE geplant sind wurde jedoch beschlossen, dass nur eine Gesamtanlagenbetrachtung der verbleibenden Produktionsbereiche Faserproduktion, Viskoseproduktion und RGS Anlagen durchgeführt wird.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Bereich Zellstoffproduktion und Energie 2

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Besondere Einschränkungen und Vereinfachungen

Die Eindampfanlagen wurden nicht im Detail betrachtet, sondern nur der reine Dampf- und Kühlwasserbedarf der einzelnen Eindampfanlagen berücksichtigt. Grund dafür ist, dass eine Optimierung der Verschaltung zwischen den Verdampferstufen sehr zeitintensiv ist und darüber hinaus ein Umbau der existierenden Anlagen geplant ist.

Die Kesselanlagen wurden ebenfalls nicht im Detail mit den implementierten Wärmetauscherflächen berücksichtigt. Diese Berücksichtigung ist aufgrund der vorhandenen Simulationsdaten einerseits nicht möglich und andererseits auch nicht sinnvoll, da diese Wärmetauscher nicht geändert werden können und die Nutzung des heißen Abgases zur Dampferzeugung optimal ist.

Der Bereich der Danisco Anlage sowie die im SimeX Flowsheet grau abgebildeten Wärmetauscher wurde nicht mitberücksichtigt, da in diesen Fällen die für die Optimierung erforderlichen Daten nicht zur Verfügung standen.

Aufgrund der hohen Anzahl an Strömen in diesem Bereich wurde eine Teilung des Bereichs am Pinch Punkt durchgeführt und die beiden Teile oberhalb und unterhalb des Pinch Punktes getrennt von einander optimiert.

Targeting und HLD-Optimierung

Pinchtemperatur

	Pinchtemperatur [$^\circ\text{C}$]
Winter 2006	51,62
Sommer 2007	55,91

Die Pinchtemperaturen weichen für beide Betriebsfälle nur wenig voneinander ab. Bezogen auf den auftretenden Temperaturbereich in dieser Anlage liegt die Pinchtemperatur sehr niedrig.

Die Pinchkurven für die beiden Betriebsfälle zeigen, dass nicht nur die Pinchtemperaturen sehr ähnlich sind, sondern auch dass die Temperatur-Enthalpie-Verläufe bis auf wenige Ausnahmen sehr ähnlich sind.

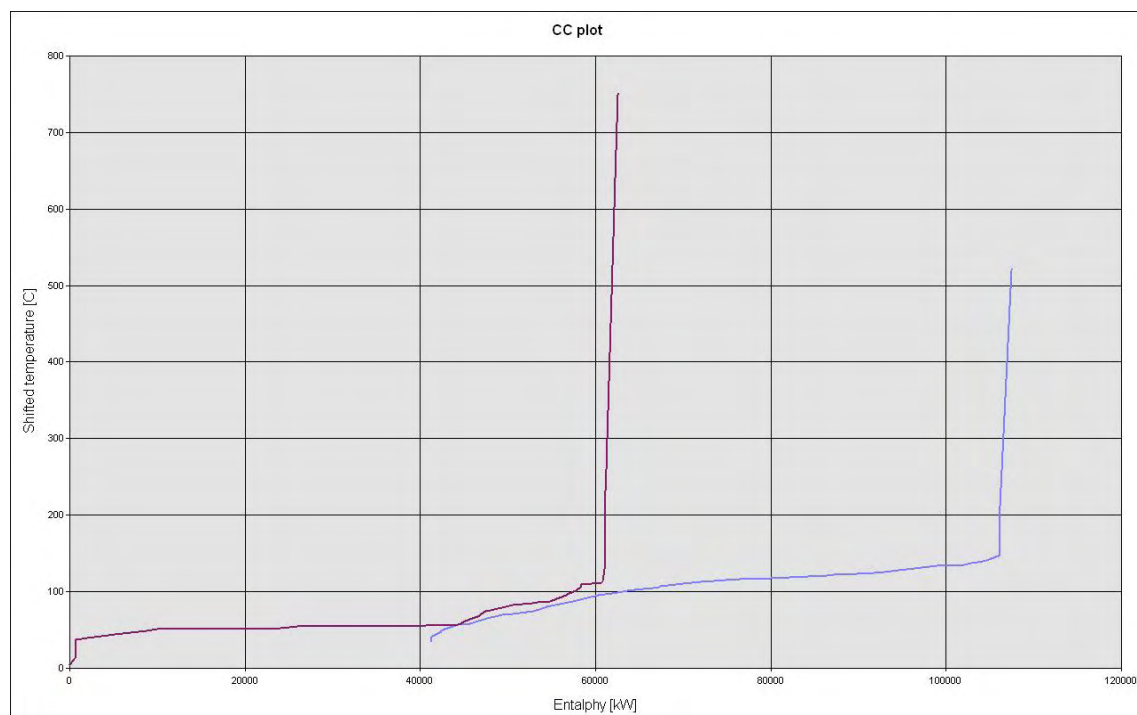


Abbildung 2: Composite Curve für Zellstoffproduktion und Energie 2, Winterbetrieb

Die Ergebnisse des Targetings und der Vergleich mit den Werten der realen Anlage zeigen, dass ein großer Anteil der theoretisch möglichen Wärmeintegration bereits realisiert wurde. Das Potential für weitere Wärmeintegration ist dagegen, besonders gemessen am gesamten Bedarf an Heiz- und Kühlenergie, gering.

Um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, wären aber dennoch mindestens 6-10 zusätzliche Wärmetauscher erforderlich, um das vorhandene Wärmeintegrationspotential umsetzen zu können.

HEN-Optimierung

Aus den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass die reale Umsetzung des theoretischen Wärmeintegrationspotentials nur teilweise und mit einem hohen Einsatz an Wärmetauschern möglich ist.

Umsetzungsvorschläge auf Basis der Optimierungsergebnisse

Die Optimierung dieses Teilbereiches hat zu keinen konkreten Optimierungsvorschlägen auf Basis der Ergebnisse geführt. Grund dafür ist, dass in diesem Teilbereich umfangreiche Umbauarbeiten geplant sind und daher eine detaillierte Betrachtung und vor allem der Arbeitseinsatz für die Ermittlung der Einschränkungen der Stromkombinationen als nicht sinnvoll erachtet wurden. Ohne Einschränkung der Stromkombinationen wurden jedoch zu viele unrealisierbare Stromverknüpfungen gefunden, weshalb keine realisierbaren Vorschläge gemacht werden konnten.

Bereich Energie 1

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Besondere Einschränkungen und Vereinfachungen

Auch hier wurden, wie bereits für den Bereich Zellstoffproduktion und Energie 2 beschrieben, die Kesselanlagen aus denselben Gründen nicht mitberücksichtigt.

Targeting und HLD-Optimierung

Pinchtemperatur

	Pinchtemperatur [$^\circ\text{C}$]
Winter 2006	66,0
Sommer 2007	44,45

Die Pinchtemperatur liegt im Winterbetrieb für diesen Bereich wesentlich höher als im Sommerbetrieb. Bezogen auf den auftretenden Temperaturbereich in dieser Anlage liegt die Pinchtemperatur eher niedrig.

Pinchkurven

Die Pinchkurven für die beiden Betriebsfälle zeigen, dass auch die Temperatur-Enthalpie-Verläufe in beiden Betriebsfällen unterschiedlich sind. Der Großteil der Unterschiede zwischen den beiden Betriebsfällen liegt dabei unterhalb der Pinchtemperatur.

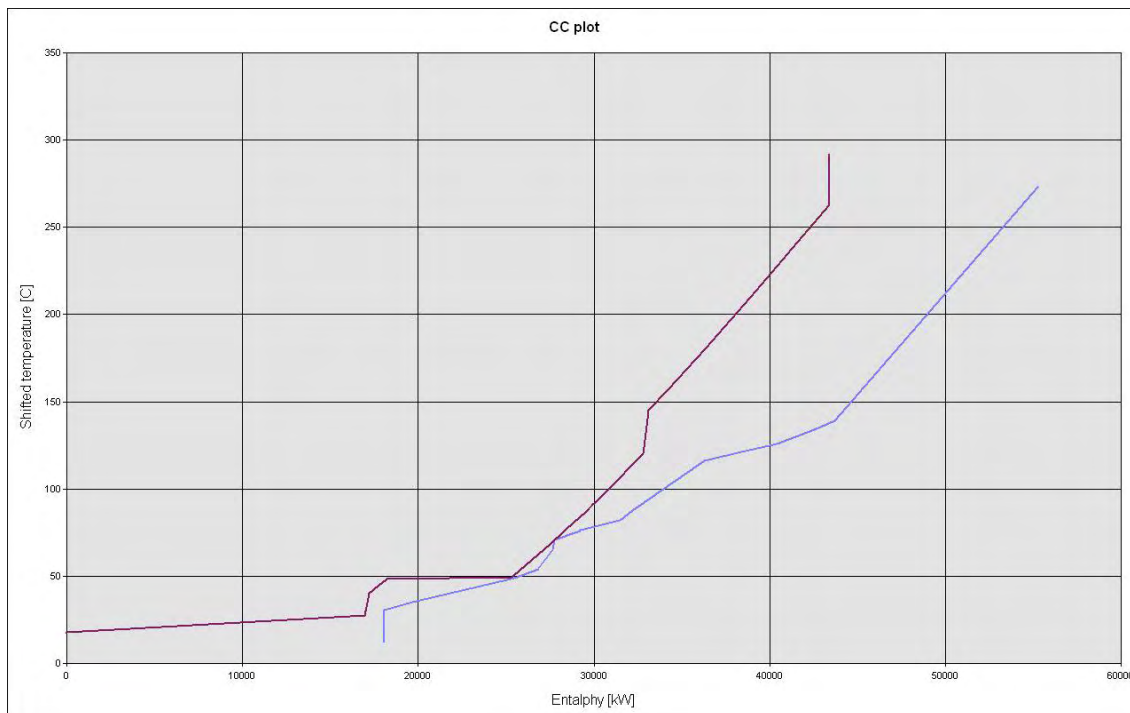


Abbildung 3: Composite Curve für Energie 1, Winterbetrieb

Die Ergebnisse des Targetings und der Vergleich mit den Werten der realen Anlage zeigen, dass der Anteil der bereits erfolgten Umsetzung der theoretisch möglichen Wärmeintegration stark vom Betriebsfall der Anlage abhängt. Im Winterbetrieb liegt dabei das verbleibende Wärmeintegrationspotential wesentlich höher als im Sommerbetrieb.

Die errechnete minimale Anzahl an Wärmetauschern die benötigt wird, um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, liegt für diesen Bereich nur unwesentlich höher als die reale Anzahl an Wärmetauschern in der Anlage.

Umsetzungsvorschläge auf Basis der Optimierungsergebnisse

Im Zuge der Ergebnisdiskussion hat sich für diesen Teilbereich herausgestellt, dass aufgrund der sehr unterschiedlichen Betriebsweise zwischen Sommer- und Winterbetrieb und weiterer Einschränkungen keine zusätzlichen, d.h. über die bereits bestehenden Wärmeintegrationen hinausgehenden, Möglichkeiten für einen Prozesswärmetausch vorhanden sind. In diesem Bereich konnten daher keine Vorschläge für neue Wärmetauscher gemacht und damit auch kein Retrofit durchgeführt werden.

Bereich Brüdenkondensationsextraktion (BKE)

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 4 \text{ °C}$ und 10 °C .

Ursprünglich wurde auch in diesem Bereich die Berechnung mit $\Delta T_{\min} = 10 \text{ °C}$ durchgeführt. Die Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die Unterschätzung des Integrationspotentials mit dieser Temperaturdifferenz zu groß ist, da damit nicht einmal das reale Ausmaß an Wärmeintegration ermittelt werden konnte. Aus diesem Grund wurde die Temperaturdifferenz auf einen mittleren Wert abgesenkt, der in den großen Wärmetauschern zur Wärmerückgewinnung zwischen den Sumpfpunkten der Strippungen und den Kopfprodukten der Extraktionskolonnen realisiert ist.

Aufgrund der hohen Anzahl an Strömen in diesem Bereich wurde eine Teilung des Bereichs am Pinch Punkt durchgeführt und die beiden Teile oberhalb und unterhalb des Pinch Punktes getrennt von einander optimiert.

Targeting und HLD-Optimierung

In diesem Abschnitt werden sowohl die Ergebnisse mit $\Delta T_{\min} = 10 \text{ °C}$ als auch mit $\Delta T_{\min} = 4 \text{ °C}$ dargestellt, um die Auswirkungen der geänderten Temperaturdifferenz darzulegen.

Pinchtemperatur

	Pinchtemperatur [°C]	
ΔT_{\min} [°C]	10	4
Winter 2006	126,0	123,0
Sommer 2007	126,0	123,0

Die Pinchtemperaturen sind für beide Betriebsfälle jeweils exakt gleich. Auch der Unterschied zwischen den Berechnungen mit den beiden unterschiedlichen minimalen Temperaturdifferenzen ist nur minimal, wobei mit niedrigerer Temperaturdifferenz auch eine niedrigere Pinchtemperatur erhalten wird. Im Vergleich zum gesamten Temperaturbereich in dieser Anlage liegt die Pinchtemperatur leicht oberhalb der mittleren Temperatur in der Anlage.

Pinchkurven

Hier werden nur die Pinchkurven für die endgültig gewählte Optimierungsvariante mit $\Delta T_{\min} = 4 \text{ °C}$ dargestellt, da die Kurven mit $\Delta T_{\min} = 10 \text{ °C}$ nur eine leichte horizontale Verschiebung der kalten Kurve aufweisen. Auch die Pinchkurven zeigen, dass die beiden Betriebsfälle der Anlage fast idente Temperatur-Enthalpieverläufe aufweisen.

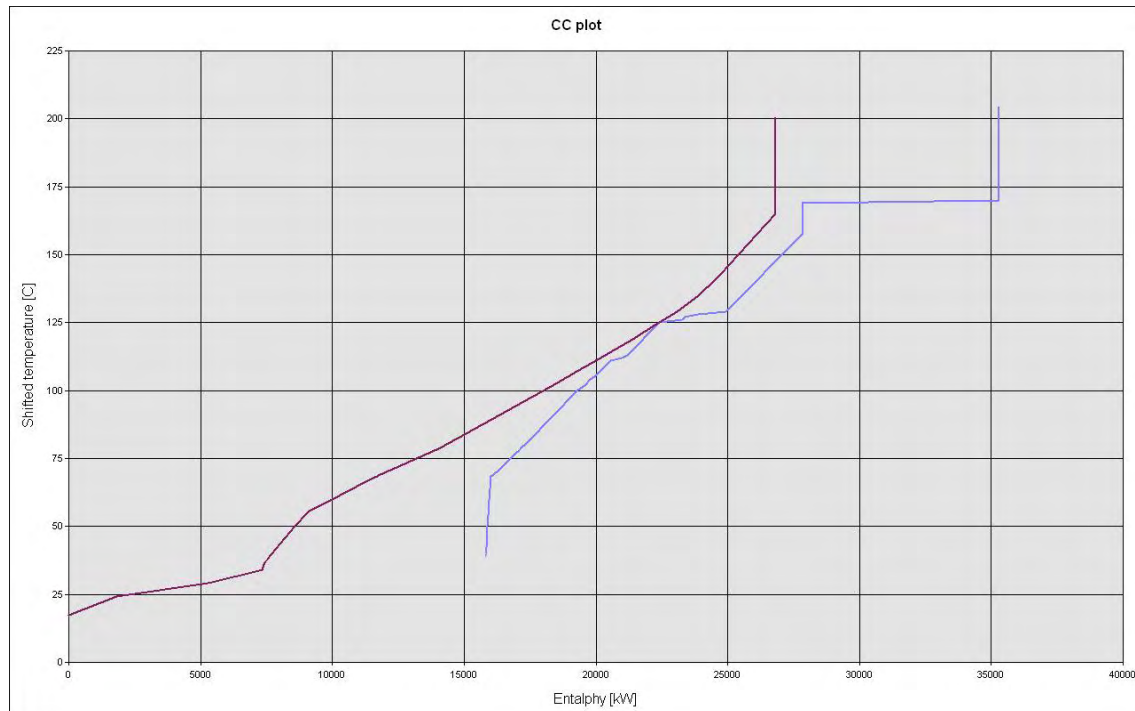


Abbildung 4: Composite Curve für BKE, Winterbetrieb, $\Delta T_{\min} = 4 \text{ °C}$

Die Ergebnisse des Targetings und der Vergleich mit den Werten der realen Anlage zeigen, dass sich durch die Absenkung der minimalen Temperaturdifferenz in den Wärmetauschern das Wärmeintegrationspotential mehr als verdoppelt hat. Im Vergleich zur bereits realisierten Wärmeintegration in der Anlage ist das verbleibende Integrationspotential jedoch trotz der Absenkung der minimalen Temperaturdifferenz gering.

Minimale Wärmetauscheranzahl

	Minimale Wärmetauscheranzahl		Reale Wärmetauscheranzahl
$\Delta T_{\min} \text{ [°C]}$	10	4	-
Winter 2006	66	68	75
Sommer 2007	65	67	75

Die errechnete minimale Anzahl an Wärmetauschern die benötigt wird, um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, ist für beide Betriebsfälle und für beide Varianten der minimalen Temperaturdifferenz sehr ähnlich. Die minimale errechnete Wärmetauscheranzahl liegt in diesem Bereich niedriger als die reale Wärmetauscheranzahl. Das liegt daran, dass viele Kühlungen in diesem Bereich durch mehrere hintereinander geschaltete Wärmetauscher realisiert wurden, um eine bessere Kühlwirkung zu erzielen.

HEN-Optimierung

Die Ergebnisse zeigen, dass für die reale Umsetzung des verbleibenden Wärmeintegrationspotentials relativ viele zusätzliche Wärmetauscher benötigt werden. Dabei ist anzumerken, dass es durch die

Auftrennung des Bereiches am Pinch Punkt und den Abbruch noch nicht vollständig konvergierter Berechnungen teilweise dazu kommt, dass die Ergebnisse nicht ganz dem Optimum entsprechen. Daher werden eine niedrigere Wärmeintegration sowie eine höherer Anzahl an Wärmetauschern als im Optimum erhalten.

Andererseits zeigt der Vergleich des Wärmeintegrationspotentials für den Winterbetrieb mit 3 Stufen und einer Splittung auf maximal 2 Ströme mit dem im Targeting ermittelten Wärmeintegrationspotential, dass bei der HEN-Optimierung ein höheres Integrationspotential ermittelt wird. Das lässt darauf schließen, dass das Targeting Ergebnis kein globales sondern nur ein lokales Optimum darstellt. Durch die Auftrennung des Bereichs am Pinch Punkt konnte hier erreicht werden, dass ein besseres Optimum für die Anlage gefunden wurde.

Bereich Viskose

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Targeting und HLD-Optimierung

Pinchtemperatur

	Pinchtemperatur [$^\circ\text{C}$]
Winter 2006	61,0
Sommer 2007	60,46

In diesem Bereich liegt kein eigentlicher Pinch Punkt vor, da es keinen Punkt innerhalb des Bereiches gibt, an dem die beiden Kurven einen minimalen Abstand von 10°C aufweisen und die höchste Temperatur der kalten Summenkurve noch rechts von der höchsten Temperatur der heißen Summenkurve liegt. In diesem Fall wird die kalte Summenkurve so weit nach links geschoben, bis die rechten Enden beider Kurven senkrecht untereinander zu liegen kommen. In solchen Systemen kann der Heizbedarf des Systems vollständig durch Wärmeintegration abgedeckt werden. Die angegebene Pinch Temperatur entspricht also nur einem „Pseudo Pinch Punkt“.

Pinchkurven

Hier sind die Pinchkurven dargestellt, die sich für den Bereich ohne Berücksichtigung von Einschränkungen für die Stromverknüpfungen ergeben.

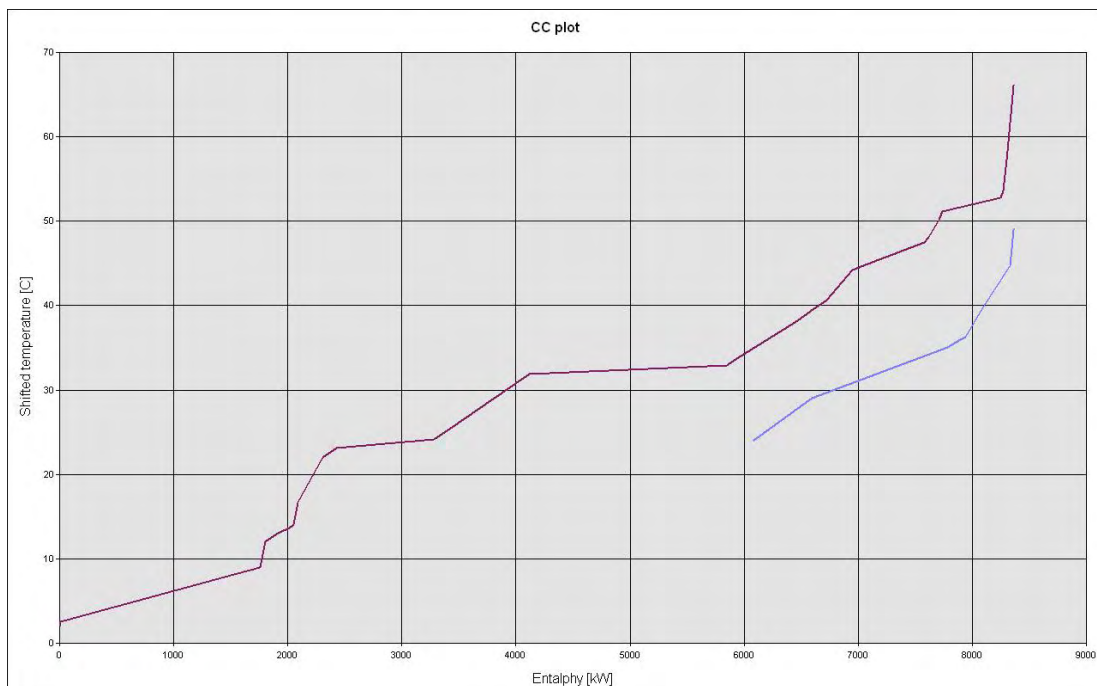


Abbildung 5: Composite Curve für Viskose, Winterbetrieb, ohne Einschränkung der Stromkombinationen

Die Pinchkurven zeigen, dass im Bereich Viskose theoretische sowohl im Winter als auch im Sommer ein Betrieb ohne externe Heizung möglich ist. Die gesamte benötigte Heizenergie kann durch Wärmeintegration bereitgestellt werden.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen mit und ohne Einschränkung der Stromkombinationen zeigt, dass durch die Einschränkungen das Wärmeintegrationspotential nur leicht herabgesetzt wird. Der Unterschied zwischen dem Sommer- und dem Winterbetrieb ist ohne Einschränkungen der Stromkombinationen höher als mit Berücksichtigung der Einschränkungen.

Minimale Wärmetauscheranzahl

	Minimale Wärmetauscheranzahl		Reale Wärmetauscheranzahl
	Nein	Ja	
Eingeschränkte Stromkombinationen			-
Winter 2006	32	32	32
Sommer 2007	31	32	32

Die errechnete minimale Anzahl an Wärmetauschern die benötigt wird, um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, ist für beide Betriebsfälle fast bzw. völlig ident und entspricht der real implementierten Anzahl an Wärmetauschern.

HEN-Optimierung

Die Ergebnisse der Wärmetauschernetzwerkoptimierung zeigen, dass es bereits mit sehr wenig Aufwand möglich ist, das theoretisch ermittelte Wärmeintegrationspotential zu erreichen. Dabei liegt auch die benötigte Anzahl an Wärmetauschern im Bereich der real vorhandenen Anzahl an Wärmetauschern.

Retrofit

Für die Retrofit Berechnungen in diesem Bereich wurde für jeden Wärmetauscher eine minimale Temperaturdifferenz von $\Delta T_{min} = 10 \text{ °C}$ gewählt. Die genauen Temperaturverläufe in den die Umsetzbarkeit des ersten Retrofit Vorschlags ist in abgewandelter Form möglich.

Bereich Faserproduktion

Die Festlegung dieses Produktionsbereichs konnte nicht anhand des übernommenen SimeX Flowsheets durchgeführt werden. Das Gesamtflowsheet für den Bereich Faser und RGS umfasst zu viele energierelevante Ströme, um sie in einem einzigen Optimierungsschritt zu betrachten. Es wurde daher entschieden, diesen Gesamtbereich weiter zu unterteilen. Nach einigen Testrechnungen und Absprache mit den Bereichsverantwortlichen wurde festgelegt, dass eine Unterteilung in die Bereiche Faserproduktionslinien und RGS erfolgen soll. Der Bereich Faserproduktion umfasst dabei die einzelnen Faserlinien inklusive SPB-Verdampferanlagen und Kristallisationsanlagen sowie die Kalzinierungsanlage.

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{min} = 5 \text{ °C}$ bzw. 10 °C .

Ursprünglich wurde auch in diesem Bereich die Berechnung mit $\Delta T_{min} = 10 \text{ °C}$ durchgeführt. Im Zuge der Berechnung des Bereiches mit eingeschränkten Stromkombinationen hat sich jedoch gezeigt, dass diese Temperaturdifferenz zu einer Unterschätzung des Integrationspotentials führt. Daher wurde die minimale Temperaturdifferenz auf den plausibleren Wert von 5 °C gesenkt. Zu Vergleichszwecken wurde das Targeting ohne Einschränkung der Stromkombinationen nochmals mit 5 °C durchgeführt. Die weiteren Berechnungen ohne Einschränkung der Stromkombinationen wurden jedoch aufgrund der langen Rechenzeiten nicht wiederholt.

Besondere Einschränkungen und Vereinfachungen

Bei der Betrachtung der Ströme ohne Einschränkung der Stromkombinationen musste der Bereich aufgrund der hohen Stromanzahl weiter unterteilt werden. Die Aufteilung erfolgte dabei durch Trennung der Modal- und der Normal-Faserlinien, wobei jeweils die zugehörigen SPB-Verdampferanlagen und Kristallisationsanlagen mit in den Bereich aufgenommen wurden. Die Kalzinierungsanlage wurde mit dem Modalbereich kombiniert betrachtet, da in diesem Fall die erzielbare Wärmeintegration höher ist als bei der Kombination des Normalbereiches und der Kalzinierungsanlage. Zusätzlich mussten beide Teilbereiche am Pinch Punkt geteilt und getrennt optimiert werden, um die vorhandene Anzahl an Strömen in annehmbarer Rechenzeit bewältigen zu können.

Bei der Berechnung des Bereiches ohne Einschränkung der Stromkombinationen wurden für die Trockner der Faserlinien keine neuen Wärmetauscher vorgesehen. Die Nutzung der derzeit ungenutzten Abluftströme der Trockner für die Aufwärmung der Zuluftströme wurde erst bei der Optimierung mit eingeschränkten Stromkombinationen mitberücksichtigt.

Targeting und HLD-Optimierung

Pinchtemperatur

	Pinchtemperatur [°C]				Faserbereich, Stromkombinationen eingeschränkt
	Stromkombinationen uneingeschränkt				
	Modallinien + Kalzinierung		Normallinien		
ΔT_{\min} [°C]	5	10	5	10	5
Winter 2006	68,7	71,2	49,43	51,93	68,12
Sommer 2007	69,53	71,98	52,88	55,38	69,53

Die Ergebnisse für die Pinchtemperatur zeigen, dass die Pinchtemperatur für jeden Betriebsfall innerhalb einer Variante sehr wenig Unterschied aufweisen. Auch die Änderung der minimalen Temperaturdifferenz hat wenig Einfluss auf die Lage der Pinchtemperatur. Der Vergleich zwischen dem Bereich „Modallinien + Kalzinierung“ und dem Bereich „Normallinien“ zeigt jedoch, dass die Lage der Pinchtemperatur zwischen den beiden Bereichen sehr unterschiedlich ist. Für den Gesamtbereich (Modallinien, Normallinien und Kalzinierung) mit Berücksichtigung der Einschränkungen für die Stromkombinationen liegt die Pinchtemperatur wieder im gleichen Bereich wie für den Teilbereich „Modallinien + Kalzinierung“.

Pinchkurven

Hier sind die Pinchkurven für den gesamten Faserbereich, der die Modallinien, die Normallinien und die Kalzinierung umfasst, mit einer minimalen Temperaturdifferenz von 5°C und unter Berücksichtigung der Einschränkungen für die Stromkombinationen dargestellt.

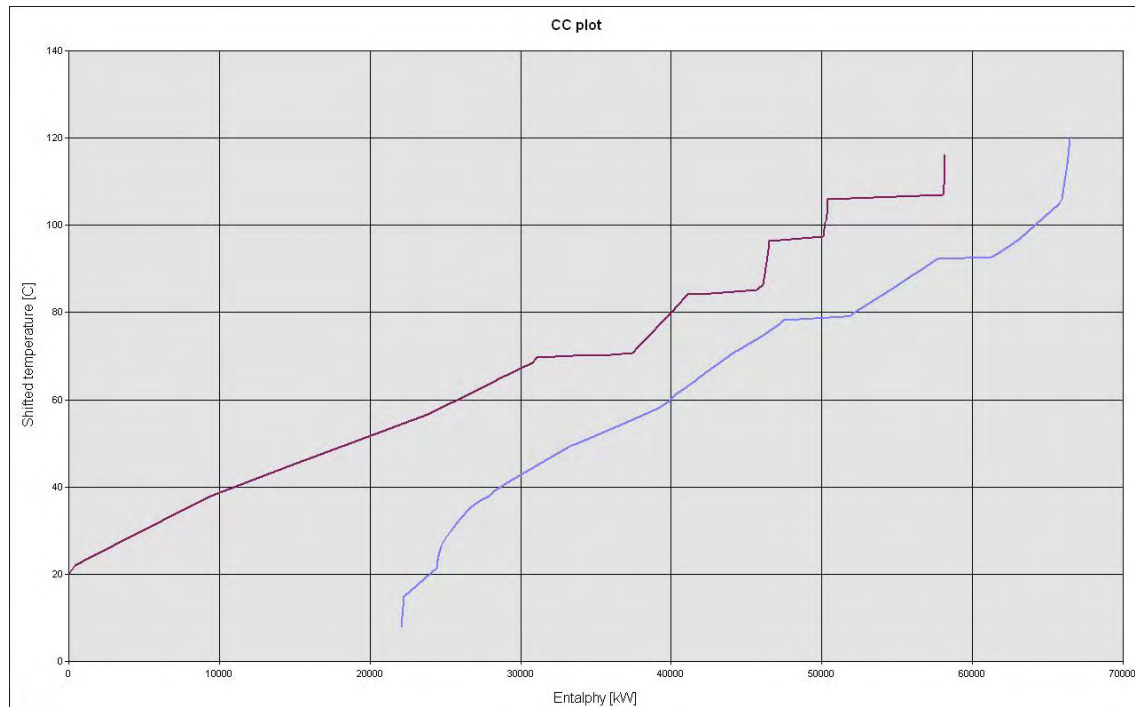


Abbildung 6: Composite Curve für Faserbereich mit Einschränkung der Stromkombinationen, Winterbetrieb, $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$

Zu den Ergebnissen ist anzumerken, dass in der realen Anlage zwischen den gewählten Teilbereichen „Modal + Kalzi“ und „Normal“ ein Wärmeaustausch stattfindet. Diese reale Wärmeintegration kann im Zuge der Optimierung durch die Auftrennung in die beiden Teilbereiche nicht gefunden werden. Durch diese Trennung gehen daher im Winterbetrieb 1.512,9 kW und im Sommerbetrieb 891,3 kW an möglicher Wärmeintegration verloren.

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den Varianten mit unterschiedlicher minimaler Temperaturdifferenz zeigt, dass sich die Änderung für den Bereich „Normallinien“ stärker auswirkt, wohingegen im Bereich „Modal + Kalzi“ kaum eine Änderung bewirkt wird. Darüber hinaus ist der Einfluss der Temperaturdifferenz im Sommer höher als im Winter.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit der ursprünglich gewählten minimalen Temperaturdifferenz von 10 °C nicht einmal das real ausgeführte Wärmeintegrationspotential ermittelt werden kann. Daher wurde auch die Absenkung der Temperaturdifferenz auf die realistischen 5 °C durchgeführt.

Der Vergleich der errechneten minimalen Anzahl an Wärmetauschern die benötigt wird, um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, zeigt, dass besonders im Fall der Normallinien ohne Einschränkung der Stromkombinationen und im Fall des gesamten Faserbereichs mit Einschränkung der Stromkombinationen die minimale Anzahl an Wärmetauschern höher ist, als die reale Wärmetauscheranzahl. Zwischen den beiden Betriebsfällen ergibt sich jedoch kaum ein Unterschied.

HEN-Optimierung

Die Ergebnisse für die Varianten mit 2 Stufen und Splitting auf maximal 2 Ströme zeigt, dass für diese Fälle nicht einmal die reale Wärmeintegration ermittelt werden kann. Der Grund dafür ist, dass in der realen Anlage ein Strom auftritt, der im Winter auf 9 und im Sommer auf 8 Ströme aufgeteilt wird. Nachdem diese Wärmetauscher einen wesentlichen Anteil der gesamten Wärmeintegration darstellen und dieser Wärmetausch nicht durch andere Stromkombinationen ersetzt werden kann, kann nur bei einer Splitterzahl von mindestens 9 bzw. 8 ein realistisches Wärmeintegrationspotential ermittelt werden. Selbst bei dieser Splitterzahl ist das Wärmeintegrationspotential verglichen mit der bereits realisierten Wärmeintegration sehr gering und es wird eine hohe Menge an zusätzlichen Wärmetauschern für die Umsetzung dieses Potential benötigt.

Das Potential der Kombination zwischen saurem Abwasser und dem Strom aus dem Zweitbadkreislauf 2 wurde für eine Umsetzung als zu gering eingestuft.

Die verschiedenen Kombinationen mit dem Brüdendampf aus der Kalzinierung wurden als nicht umsetzbar eingestuft, da damit nicht sichergestellt werden kann, dass der gesamte Brüdendampf in jedem Fall kondensiert werden kann. Darüber hinaus spricht auch die örtliche Situation gegen diese Stromkombinationen.

Bereich RGS

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, wurde der im übernommenen SimeX Flowsheet abgebildete Gesamtbereich aus Faserproduktion und RGS in zwei Teile aufgeteilt. Der Bereich RGS umfasst dabei die Anlagenteile SuSo, Sulfo und H₂SO₄ Anlage sowie die ARA Vorkühlung.

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 4,03$ °C bzw. 6,6 °C bzw. 10 °C.

Ursprünglich wurde auch in diesem Bereich die Berechnung mit $\Delta T_{\min} = 10$ °C durchgeführt. Im Zuge der Berechnung des Bereiches hat sich jedoch gezeigt, dass diese Temperaturdifferenz zu einer Unterschätzung des Integrationspotentials führt. Grund dafür ist, dass es in diesem Bereich zwei energieanteilmäßig große Wärmetauscher gibt, einen in der SuSo und einen in der Sulfo Anlage, in denen das VE-Wasser durch die Nutzung des Wärmeinhalts von Prozessströmen aufgewärmt wird. Beide weisen eine minimale Temperaturdifferenz von nur etwas mehr als 4 °C auf. Weiters gibt es in der H₂SO₄ Anlage einen sehr großen Wärmetauscher, der eine minimale Temperaturdifferenz von 5 °C aufweist.

Targeting und HLD-Optimierung

Pinchtemperatur

In diesem Bereich liegt kein eigentlicher Pinch Punkt vor, da es keinen Punkt innerhalb des Bereiches gibt, an dem die beiden Kurven einen minimalen Abstand von 4,03 °C aufweisen und die höchste Temperatur der kalten Summenkurve noch rechts von der höchsten Temperatur der heißen Summenkurve liegt. In diesem Fall wird die kalte Summenkurve so weit nach links geschoben, bis die rechten Enden beider Kurven senkrecht untereinander zu liegen kommen. In solchen Systemen kann der Heizbedarf des Systems vollständig durch Wärmeintegration abgedeckt werden. Die angegebene Pinch Temperatur entspricht also nur einem „Pseudo Pinch Punkt“.

	Pinchtemperatur [°C]		
ΔT_{\min} [°C]	10	6,6	4,03
Winter 2006	210,2	261,9	263,19
Sommer 2007	42,8	261,9	263,19

Die Pinchtemperatur ist bei der minimalen Temperaturdifferenz von 10 °C stark vom jeweiligem Betriebsfall abhängig. Diese Temperaturdifferenz ist jedoch nicht repräsentativ für diesen Bereich. Bei Verringerung der minimalen Temperaturdifferenz auf 6,6 bzw. 4,03 °C besteht kein Unterschied mehr zwischen den beiden Betriebsfällen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Temperaturdifferenzen ist ebenfalls sehr gering.

Pinchkurven

An dieser Stelle sind exemplarisch die Pinchkurven für die Berechnungsvariante ohne Einschränkung der Stromkombinationen und mit einem $\Delta T_{\min} = 4,03 \text{ °C}$ dargestellt, da diese Temperaturdifferenz die realistischste für diesen Bereich ist.

Die Pinchkurven weisen grundsätzlich ein sehr ähnliches Aussehen auf. Im Winter liegen die beiden Kurven jedoch etwas enger zusammen als im Sommer, dadurch ergeben sich doch einige Unterschiede, die besonders gut im Vergleich zwischen den beiden Grand Composite Curves zu erkennen sind. Es ist auch zu erkennen, dass für diesen Bereich theoretisch kein Bedarf an Heizmedium besteht. Der gesamte Heizbedarf kann durch Wärmeintegration im Bereich abgedeckt werden.

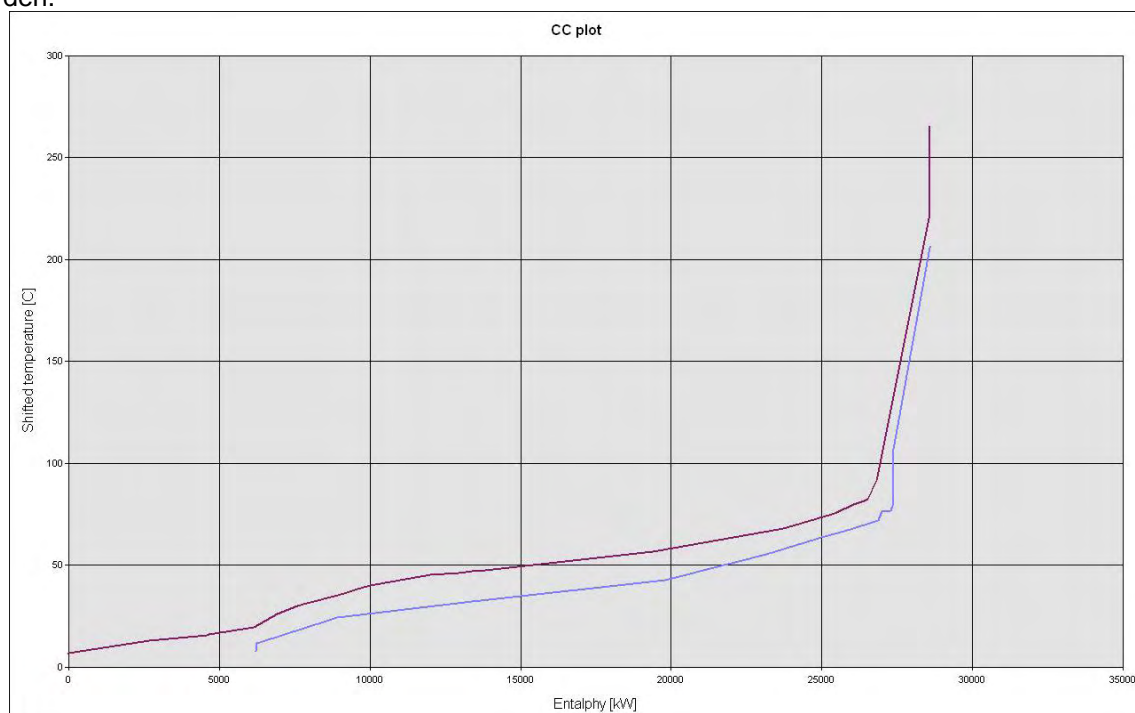


Abbildung 7: Composite Curve für RGS, Winterbetrieb

Die Ergebnisse zeigen, dass das Wärmeintegrationspotential im Sommerbetriebsfall ohne Einschränkung der Stromkombinationen stark von der gewählten minimalen Temperaturdifferenz abhängt. Ohne Einschränkung der Stromkombinationen ergibt sich noch ein Integrationspotential in der Größenordnung von 2 MW, das jedoch im Vergleich zur bereits realisierten Wärmeintegration von rund 20 MW relativ gering ist. Unter Berücksichtigung der Einschränkung der Stromkombinationen verringert sich dieses Integrationspotential auf nur mehr wenige kW.

Minimale Wärmetauscheranzahl

Die errechnete minimale Anzahl an Wärmetauschern die benötigt wird, um die optimalen Wärmeintegrationsergebnisse zu erzielen, ist relativ unabhängig von der gewählten minimalen Temperaturdifferenz und dem Betriebsfall. Mit der Berücksichtigung der Einschränkung der Stromkombinationen verringert sich auch die Anzahl der berücksichtigten Ströme und es ergibt sich insgesamt eine niedrigere minimale Wärmetauscheranzahl. Verglichen mit der realen Wärmetauscheranzahl zeigt sich, dass die reale der minimalen Anzahl an Wärmetauschern entspricht.

HEN-Optimierung

Die Ergebnisse der Wärmetauscheroptimierung zeigen, dass bei sehr niedriger Anzahl an Stufen und Anzahl an Strömen, auf die ein Strom maximal aufgesplittet werden kann, nicht einmal die reale Wärmeintegration erreicht werden kann. Ein Grund dafür ist, dass in diesem Bereich in der H₂SO₄ Anlage das EB Wasser auf 4 Ströme aufgesplittet wird. Da diese bestehende Wärmeintegration nicht

durch einen anderen Wärmetausch realisiert werden kann, können hier nur realistische Ergebnisse erzielt werden, wenn eine Splittung auf mindestens 4 Ströme zugelassen wird. Der Grund dafür, dass die Wärmeintegration bei der Kombination von 2 Stufen und Splittung auf maximal 4 Ströme niedriger als in der realen Anlage ist, ist, dass durch die Einschränkung, dass bei der Optimierung alle gesplitteten Ströme vor dem Mixer die selbe Temperatur haben müssen, ein gewisser Anteil des Integrationspotentials verloren geht. Wie bereits aus den Targeting Ergebnissen ersichtlich war, ist das maximal erreichbare Integrationspotential jedoch zu gering für eine Umsetzung.

Gesamtbereich Faserproduktion, Viskose und RGS

Ursprünglich war eine Betrachtung des gesamten Anlagenstandortes in Lenzing geplant. Aufgrund der Tatsache, dass derzeit viele Umbauarbeiten in den Bereichen Zellstoffproduktion, Energie 1, Energie 2 und BKE geplant sind wurde jedoch beschlossen, dass nur eine Gesamtanlagenbetrachtung der verbleibenden Produktionsbereiche Faserproduktion, Viskoseproduktion und RGS Anlagen durchgeführt wird.

Gewählte minimale Temperaturdifferenz in diesem Bereich: $\Delta T_{\min} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Wahl der minimalen Temperaturdifferenz erfolgte aufgrund der gewählten Temperaturdifferenzen in den Einzelbereichen. Um alle real vorhandenen Wärmetauscher durch die Optimierung ermitteln zu können, wurde daher die niedrigste gewählte Temperaturdifferenz herangezogen, die auf volle Grade abgerundet wurde.

Besondere Einschränkungen und Vereinfachungen

Der gesamte Anlagenbereich für die Teilprozesse Faserproduktion, Viskoseproduktion und RGS Anlagen umfasst eine enorme Menge an energierelevanten Strömen (ca. 200 relevante Prozessströme). Dieser Umfang an Strömen ist, wie bereits früher erwähnt, nicht in einem Schritt optimierbar. Die Wärmeintegration zwischen verschiedenen Produktionsteilen ist aufgrund der teilweise sehr großen Entfernungen aber ohnehin nur für Ströme sinnvoll, die ein gewisses Maß an benötigter Energieab- oder -zufuhr überschreiten. Aus diesem Grund wurde die Analyse nur für zwei Szenarien durchgeführt, in denen nur die Ströme berücksichtigt wurden, die entweder mehr als 500 kW oder mehr als 400 kW an Wärmezu- oder -abfuhr benötigen.

Targeting und HLD-Optimierung Pinchtemperatur

übertragene Wärmemenge berücksichtigte Ströme	Pinchtemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	
	>500 kW	>400 kW
Winter 2006	68,62	68,62
Sommer 2007	70,93	70,93

Die Ergebnisse der Pinchtemperaturen zeigen, dass sie weder von der Auswahl der Ströme über die Einschränkung der übertragenen Wärmemenge noch vom Betriebsfall abhängig ist. Verglichen mit dem gesamten Temperaturintervall des Bereiches liegt die Pinchtemperatur im unteren Temperaturdrittel und liegt in einem vergleichbaren Temperaturbereich wie die Pinchtemperatur für den gesamten Faserbereich. Das liegt daran, dass aus den Bereichen RGS und Viskose nur eine vergleichbar geringe Anzahl an Strömen in diese Analysen eingeht.

Pinchkurven

An dieser Stelle sind exemplarisch die Pinchkurven für die Variante mit allen Strömen, die mehr als 400 kW Wärmetausch benötigen und ohne Berücksichtigung von Einschränkungen der Stromkombinationen dargestellt.

Die Pinchkurven sind ebenso wie die Pinchtemperatur sehr unabhängig vom Betriebsfall der Anlage.

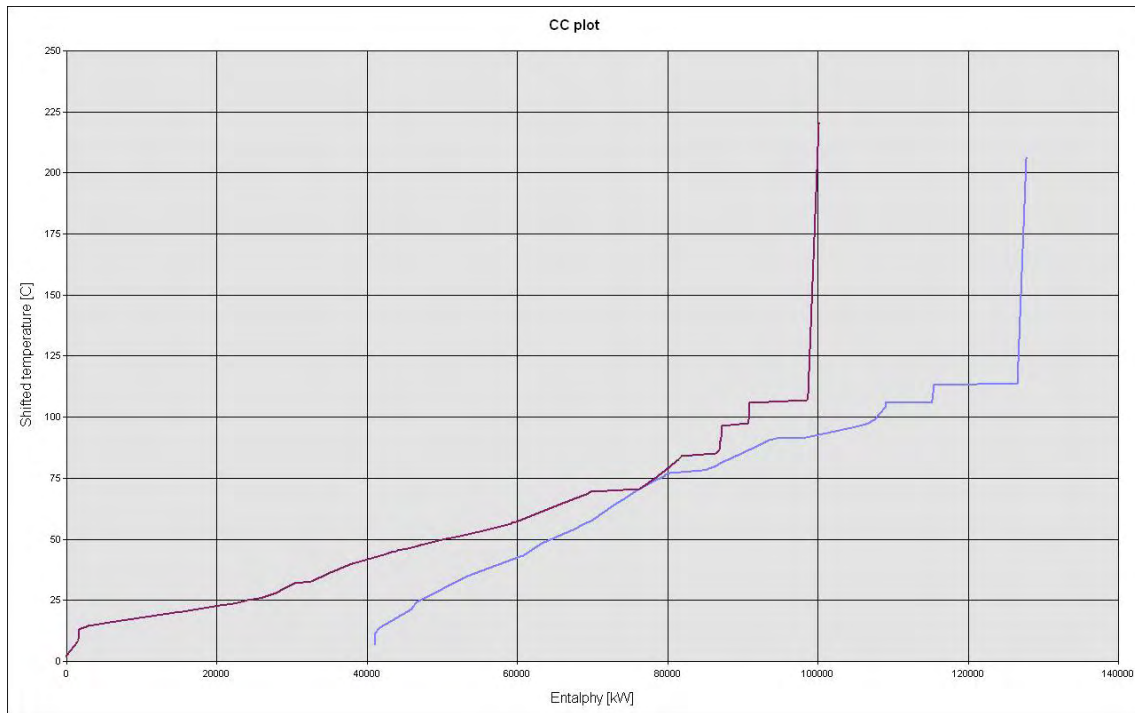


Abbildung 8: Composite Curve für Gesamtbereich Faser + Viskose + RGS, Winterbetrieb

Die Ergebnisse des Targetings zeigen, dass verglichen mit der bereits realisierten Wärmeintegration nur mehr ein geringes theoretisches Wärmeintegrationspotential besteht. Dieses Integrationspotential verringert sich durch die Berücksichtigung der Einschränkungen der Stromkombinationen noch einmal beträchtlich. Darüber hinaus besteht auch ein relativ großer Unterschied im Integrationspotential zwischen Sommer- und Winterbetrieb, der beinahe zur Gänze auf die errechnete Abdeckung des Heizbedarfs für die Belüftung der Faserhalle durch Wärmeintegration zurückzuführen ist.

Zu den Ergebnissen ist anzumerken, dass für die Varianten mit allen Strömen, die mehr als 500 kW Wärmetausch benötigen, 8 Wärmetauscher durch die Auftrennung der Ströme mit Phasenwechsel entstehen. Für die Varianten mit allen Strömen, die mehr als 400 kW Wärmetausch benötigen, gehen 10 Wärmetauscher auf diese Phasenauftrennung zurück.

Die minimale Wärmetauscheranzahl ist nur geringfügig vom Betriebsfall abhängig und ändert sich auch durch die Berücksichtigung der Einschränkungen in den Stromkombinationen nur unwesentlich. Verglichen mit der realen Wärmetauscheranzahl ist die minimale Anzahl etwas höher.

HEN-Optimierung

Die Ergebnisse für alle Ströme, die mehr als 500 kW Wärmetausch benötigen, zeigen, dass das Integrationspotential verglichen mit der bereits realisierten Wärmeintegration relativ gering ist. Speziell im Sommerbetriebsfall können darüber hinaus mit nur zwei Stufen für die Optimierung keine Ergebnisse erzielt werden können, die die reale Wärmeintegration erreichen oder übersteigen. Auch im Winterbetriebsfall wird unter Berücksichtigung, dass 2 MW der Wärmeintegration durch die real nicht vorhandene Abdeckung des Heizbedarfs für die Belüftung der Faserhalle entstehen, mit nur zwei Stufen in keinem Fall die reale Wärmeintegration erreicht. Hier ist daher eine komplexere Anlagenverschaltung zur Erzielung der realen Wärmeintegration notwendig.

Bei den Ergebnissen für die Optimierung der Ströme, die mehr als 400 kW Wärmetausch benötigen, ist das Wärmeintegrationspotential verglichen mit der real bereits ausgeführten Wärmeintegration ebenfalls gering. Hier wird jedoch nur in jeweils dem einfachsten Optimierungsfall die reale Wärmeintegration nicht erreicht. Verglichen mit den Ergebnissen für die Variante mit allen Strömen, die mehr als 500 kW Wärmetausch benötigen, können in diesem Optimierungsfall höhere Wärmeintegrationspotentiale erzielt werden. Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass 10 errechnete Wärmetauscher auf die Auftrennung der Ströme mit Phasenwechsel zurückzuführen sind, ist die Anzahl an Wärmetauschern, die für die Realisierung des Wärmeintegrationspotentials benötigt werden, um einiges höher als die reale Anzahl an Wärmetauschern.

Zusammenfassend sind die gefundenen Einsparpotentiale der einzelnen Optimierungsschritte als Diagramm dargestellt. Letztendlich bleiben nur im Bereich der BKE, der Viskoseproduktion und der RGS realisierbare Einsparpotentiale über.

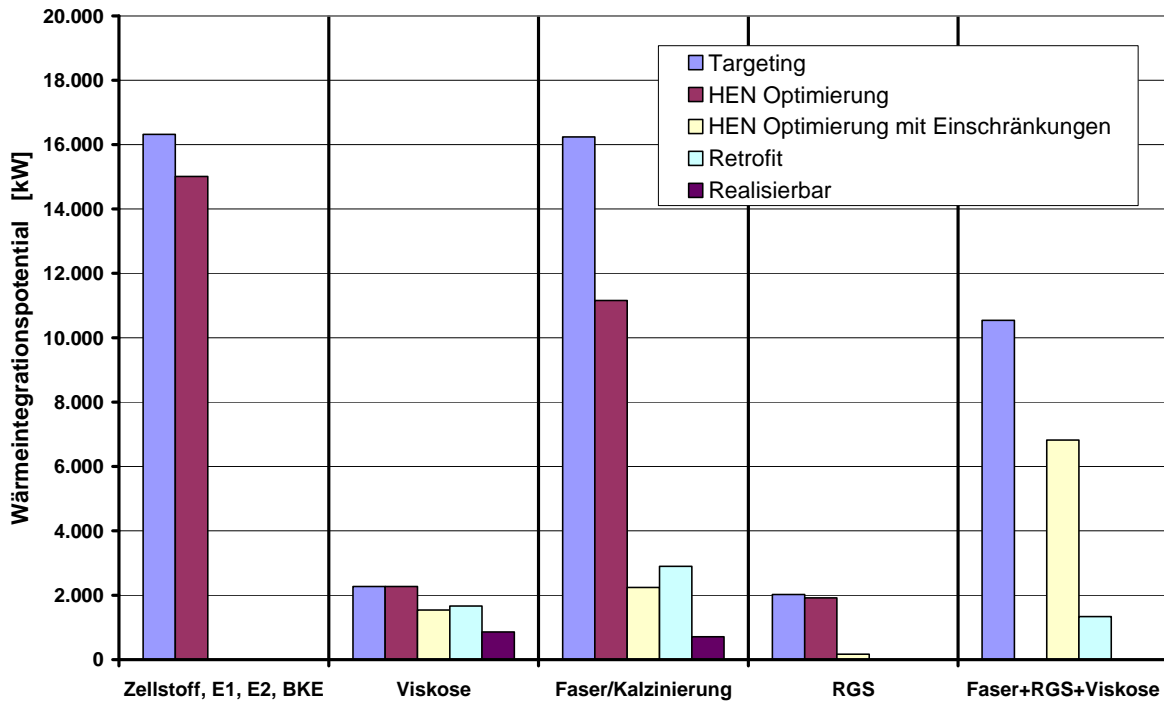


Abbildung 9 Übersicht über die Einsparpotentiale

Zum einen leitet sich aus den Ergebnissen ab, dass der real erreichte Optimierungsgrad sehr hoch ist und bezogen auf den Energieeinsatz nur ein sehr geringes Einsparpotential besteht. Besonders der Bereich der RGS gilt als hervorragend optimiert. Auch sind keine Verbesserungen durch Wärmetausch über die Abteilungsgrenzen erzielbar.

4 Ausblick

Eine reine energetische Optimierung des Standortes in Lenzing hat nur mehr wenig Potential, da die Anlage bereits in großem Ausmaß optimiert ist. Daher wäre eine gemeinsame energetische und prozesstechnische Optimierung anzustreben. Das Augenmerk sollte dabei nicht unbedingt auf den reinen Produktionsprozessen liegen, sondern mehr auf den erforderlichen Nebenprozessen, um Eingriffe in den Produktionsprozess und mögliche Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Ein Beispiel hierfür wäre die Untersuchung der Möglichkeit, Aufkonzentrierungen mit Hilfe der Membrantechnologie durchzuführen um Eindampfanlagen teilweise ersetzen zu können.

Die Durchführung einer Wasser-Pinch Analyse wäre eine weitere Möglichkeit den Standort in Lenzing zu optimieren. Bei dieser Optimierung werden die Wasser-Utilities energetisch und über ihre Reinheit betrachtet und deren Einsatz darauf aufbauend möglichst minimiert.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist die Durchführung einer Exergieanalyse für den Standort.

Die weiterführenden Arbeiten die das gesamte Netzwerk der Lenzing AG betreffen sind allesamt hoch riskant, da der Erfolg jeder Analyse des nahezu unüberschaubaren Netzwerks als sehr schwierig und extrem aufwendig erscheint. Jedenfalls wird man, wie auch in diesem Projekt, an die Grenzen der Rechnerleistungen stoßen.

Erfolgversprechend sind hingegen detaillierte Betrachtungen von Teilbereichen und Anlagen überschaubarer Größe, wie etwa Eindampfanlagen, oder einzelne Faserrockner.

5 Literatur

- L. T. Biegler, I. E. Grossmann, A. W. Westerberg; *Systematic Methods of Chemical Process Design*. Prentice Hall, 1997.
- K.-M. Björk, R. Nordman; Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods; *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44(8), 869-876.
- E. Blaß; *Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse*. Frankfurt am Main. Otto Salle Verlag, Verlag Sauerländer, 1989.
- R. F. Dunn, M. M. El-Halwagi; Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry; *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2003, 78(9), 1011-1021.
- M. Ebrahim, A. Kawari; Pinch technology: an efficient tool for chemical-plant energy and capital-cost saving; *Applied Energy*, 2000, 65(1-4), 45-49.
- J. Klemes, P. Stehlík; Recent advances on heat, chemical and process integration, multiobjective and structural optimisation; *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(13), 1339-1344.
- B. Linnhoff; Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks; *AIChE Journal*, 1978, 24(4), 633-642.
- B. Linnhoff; Synthesis of heat exchanger networks: II. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality; *AIChE Journal*, 1978, 24(4), 642-654.
- B. Linnhoff, E. Hindmarsh; The pinch design method for heat exchanger networks; *Chemical Engineering Science*, 1983, 38(5), 745-763.
- B. Linnhoff; Pinch analysis - a state-of-the-art overview; *Chemical Engineering Research and Design*, 1993, 71(A5), 503-522.
- B. Linnhoff, D. W. Townsend, D. Boland; *A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. The Institution of Chemical Engineers, 1994.
- S. Sieniutycz, J. Jezowski; *Energy Optimization in Process systems*. Elsevier, 2009.
- F. X. X. Zhu, L. Vaideeswaran; Recent research development of process integration in analysis and optimisation of energy systems; *Applied Thermal Engineering*, 2000, 20(15-16), 1381-1392.