

# Betriebskosten von Altholz- und Biomasseanlagen - Optimierungspotenziale

*Dipl.-Ing. Jens Kötting, IGEU Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umwelttechnik mbH, Neuried*

## 1 Zusammenfassung

Nach Einführung des EEG und dem damit verbundenen finanziellen Anreiz, nachwachsende Rohstoffe zu nutzen, sind in den vergangenen Monaten bzw. Jahren Projekte wie Pilze aus dem Boden geschossen. Der Kampf um den Rohstoff „Holz“ ist entbrannt. Langfristig werden sich jedoch nur die Anlagen durchsetzen und wirtschaftlich betrieben werden können, bei denen bereits von Beginn an auf eine Optimierung der Kosten- und Erlössituation geachtet wurde. Dabei muss sowohl das Brennstoffpotenzial als auch die gesamte Logistikkette des Brennstoffes bezogen auf den jeweiligen Standort mit einbezogen werden. Eine höhere Stromausbeute, verbunden mit dem Wechsel auf eine andere Technologie, muss nicht zwangsläufig zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führen.

Der nachfolgende Vergleich verschiedener Verfahren und den damit verbundenen Kosten bzw. Erlösen wurde konkret für einen Investor durchgeführt. Er diente dazu, für mehrere Standorte eine grundsätzliche Entscheidung bezüglich der einsetzbaren Technologien vorzubereiten. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde neben einer 42 MW-Anlage zusätzlich eine 10 MW-Anlage dargestellt, um die Auswirkungen der verschiedenen Leistungsklassen auf die Wirtschaftlichkeit zeigen zu können.

Die „Großanlage“ schneidet erwartungsgemäß günstiger ab. Bei der 10 MW-Anlage kommt aus wirtschaftlichen Erwägungen nur naturbelassener Brennstoff in Frage. Erlöse aus dem Wärmeverkauf sind bei dezentralen Anlagen eher zu erwarten, da die Anzahl der Standorte mit adäquater Wärmeabnahme höher ist. Gleichzeitig können i.d.R. höhere Wärmepreise auf Grund einer „Kleinabnehmerstruktur“ realisiert werden. Die Betrachtung zeigt, dass die Güte der Stromerzeugung bei beiden Anlagenleistungen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage hat. Auf deren Optimierung sollte größter Wert gelegt werden, allerdings ohne die Verfügbarkeit der Gesamtanlage zu beeinträchtigen.

Der Rostfeuerung ist im konkreten Beispiel (42 MW-Anlage) der Vorzug gegenüber einer Wirbelschichtfeuerung zu geben. Die Gründe liegen in diesem Fall in der Höhe der zusätzlichen Aufbereitungskosten für den Brennstoff und den Investitionskosten. Die Vergasungsverfahren können gegenüber beiden vorge-

nannten Technologien keine Berücksichtigung finden. Entgegen der Ankündigung einiger Hersteller zeigte sich, dass die spezifischen Investitionskosten bezogen auf die installierte elektrische Leistung höher sind als bei den anderen Verfahren. Dabei sollte gerade hier die Vergasung einen Vorteil aufweisen. Die weitere Entwicklung, vor allem hinsichtlich der Verfügbarkeit und des erreichbaren Wirkungsgrades, muss für eine endgültige Beurteilung abgewartet werden.

## 2 Vergleich verschiedener Technologien

Generell werden Verbrennungs- und Vergasungstechnologien unterschieden. Unter die Verbrennungssysteme fallen sämtliche Arten von Rost- als auch Wirbelschichtfeuerungen.

Rostfeuerungen zeichnen sich im Allgemeinen durch eine große Variationsbreite und Flexibilität bzgl. der Brennstoffeigenschaften aus. Sie können für trockene als auch feuchte Brennstoffe ausgelegt werden, weisen eine hohe Bandbreite zwischen minimal und maximal zulässigem Heizwert auf und sind in kleinen (100 kW) bis hin zu großen Anlagenleistungen verfügbar (ca. 70 MW). Nachfolgend eine kurze Auflistung verfügbarer Rostsysteme:

Schräg- bzw. Treppenroste

wurden vielfach für Holz- und Kohlefeuerungen eingesetzt. Auf Grund der schlechten Regelbarkeit und einem ungünstigen Emissionsverhalten werden sie i.d.R. nur noch als erste Roststufe oder Brennstoffzuführung eingesetzt. Für die Verfeuerung von Altholz ist er nicht geeignet. Eine Ausnahme bildet hier der sogenannte Vibrorost, bei dem der Brennstoff durch „Rütteln“ des Rostes transportiert wird.

Schubroste (Vorschub-, Rückschub-, Gegenlauf-Überschubrost)

werden in mehrere Zonen eingeteilt, in denen sowohl Transportgeschwindigkeit des Brennstoffes als auch die Verteilung der Verbrennungsluft geregelt werden kann. Der Einsatz von wassergekühlten Rosten bei sehr trockenen Brennstoffen ist möglich. Diese sind thermisch hoch belastbar, haben jedoch in vielen Fällen Wirkungsgradverluste, da die entzogene Wärme, je nach Temperatur und Druck, nicht immer in den Wasser-Dampf-Kreislauf integriert werden kann. Diese Rostart wurde bereits erfolgreich bei 17. BImSchV-Anlagen (Siedlungsmüll, Altholz) eingesetzt.



Foto: Richard Kablitz & Mitthoff GmbH

## Wanderroste

haben ein endloses Rostband. Das traditionelle Einsatzgebiet ist die Verfeuerung von Kohle. Das Endlosband weist eine konstante Transportgeschwindigkeit auf. Um die damit verbundenen Nachteile bei der Nutzung von Holz auszugleichen (stark abnehmendes Volumen) erfolgt die Beschickung mit Hilfe einer Einblasung oder einer Wurfbeschickung vom Rostende aus. Dies führt zu einer gleichmäßigen Rostbelegung. Der Rost ist thermisch hoch belastbar. Die Brennstoffgröße ist durch die Art der Beschickung limitiert.

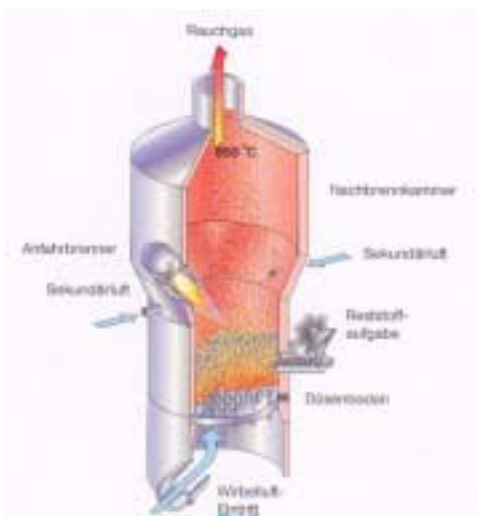


Skizze: Detroit Stoker Company

## Der Drehkegelrost

ist eine Neuentwicklung. Die Funktionsart lässt sich mit der eines Zementmischers vergleichen. Dadurch weist der Rost eine sehr gute Schürwirkung auf. Ob sich dieser Rost durchsetzen wird, ist von der Behebung und Lösung einiger Detailprobleme bei den ersten, vor kurzem realisierten, Anlagen abhängig.

Bei Wirbelschichtfeuerungen ist der Brennstoff und die Verbrennungsluft in ständiger turbulenter Bewegung. Die Luftverteilung ist über das gesamte Brennstoffbett sehr ausgeglichen. Dies führt zu niedrigeren feuerungsabhängigen Emissionen bei gleichzeitig relativ niedrigen Betttemperaturen. Der Brennstoff muss jedoch besser aufbereitet werden als bei einer Rostfeuerung, um die Vorteile der Wirbelschicht nutzen zu können. Dies betrifft in besonderem Maße auch den Anteil an Fremdstoffen wie z.B. Glas, Aluminium, etc. Wirbelschichtfeuerungen werden bei größeren Anlagenleistungen eingesetzt, wozu bei Rostfeuerungen zwei Linien erforderlich wären (Ausnahme Wanderrost). Bei neueren Konzepten wird durch den Einsatz von Additiven und anderen Überhitzermaterialien versucht, die Überhitzungstemperatur zu erhöhen, um eine höhere Stromausbeute zu erhalten. Es werden stationäre und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen unterschieden. Bei zirkulierenden Wirbelschichtfeuerungen wird das Bettmaterial so stark aufgewirbelt, dass es mit dem Brennstoff teilweise oder komplett durch die Brennkammer gefördert wird. Der technische Aufwand ist jedoch hoch und wird somit i.d.R. nur bei großen Anlagenleistungen realisiert.



Skizze: Von Roll Inova GmbH

### 3 Konzeption und Rahmendaten

Folgende Leistungsdaten und Anforderungen liegen der Bewertung zu Grunde:

42 MW-Anlage:

Verbrennungskapazität (atro)	ca. 70.000	t/a
Wirkungsgrad Energieerzeugung (abh. von Heizwert und Brennstoff)	88	%
Elektrischer Wirkungsgrad, mind.	> 28	%
Volllaststunden	7.500	h/a

Anlage nach Stand der Technik

Betriebstüchtigkeit technisch und wirtschaftlich über 3 Jahre nachgewiesen

Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV

Nach EEG wird bei einer Anlage dieser Leistung ein elektrischer Mindestwirkungsgrad von 27 % gefordert. Um diesen Wirkungsgrad während des Betriebes der Anlage gesichert einhalten zu können, wird ein höherer Wirkungsgrad bei der Auslegung gefordert. Es soll keine Pilot- oder Versuchsanlage realisiert werden, bei der das Erreichen eines wirtschaftlichen Betriebes mit Risiko behaftet ist. Aus diesem Grund können 7.500 h/a mit Volllast für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu Grunde gelegt werden.

Die Forderung nach Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV ergibt sich aus den gewählten Brennstoffsportimenten.

Folgende Brennstoffe sollen in dieser Anlage thermisch verwertet werden:

- Sägereestholz
- Rinde
- Landschaftspflegeholz
- Alt- und Gebrauchtholzsortimente A I mit A IV (Einordnung nach Entwurf der Altholz-Verordnung)

Diese Rahmendaten spielen für die nachstehende Bewertung der Systeme eine große Rolle. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, dass der wesentliche Teil der Brennstoffmenge aus Alt- und Gebrauchtholzsortimenten bestehen kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Aufbereitung dieser Sortimente flexibel gestaltet werden kann und sich der Beschickungs- und Feuerungsanlage anpasst. Damit wird erreicht, dass das Gesamtverfahren, von der Altholzannahme (ungebrochenes Holz) bis zur Feuerung, technisch und wirtschaftlich optimiert werden kann.

Das Gesamtverfahren wird auf die Stromerzeugung hin optimiert. Eine mögliche Wärmeauskopplung wird vorgesehen, ist in diesem Fall aber auf Grund der Standortgegebenheiten in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigbar.

sichtig. Für die Auslegung von Feuerung und Dampferzeuger ergibt sich folgendes Feuerungsleistungsdiagramm:

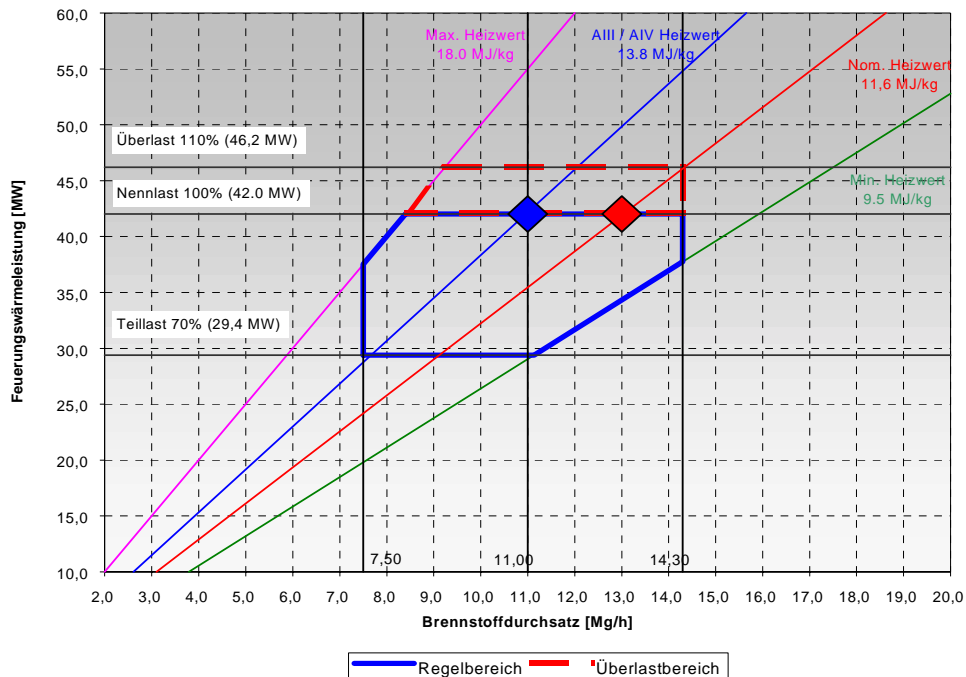


Abb. 1: Feuerungsleistungsdiagramm

Da die Feuerungsanlage stromgeführt und damit möglichst mit Volllast über die gesamte Betriebszeit gefahren werden soll, wird „nur“ eine mögliche Teillast von 70 % gefordert. Die Emissionsgrenzwerte sind über alle Betriebszustände einzuhalten.

Weiterhin sollen folgende technische Daten eingehalten und / oder gewährleistet werden (auszugsweise):

- Anlagenverfügbarkeit
- Reisezeit
- Leistungsdaten in ausgewählten Lastpunkten
- Verbrauchsdaten (Strom, Dampf, Wasser, Heizöl bzw. Erdgas, Chemikalien, etc.)
- Rückstandsqualitäten und -mengen
- Emissionen (luftfremde Stoffe, Schall, etc.)

Um die wirtschaftlichen Unterschiede zwischen zwei verschiedenen Leistungsklassen beurteilen zu können, wurde parallel dazu eine Anlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 10 MW betrachtet.

10 MW-Anlage:

Verbrennungskapazität (atro)	ca. 17.000	t/a
Elektrische Leistung	mind. 2,0	MW
Volllaststunden	7.500	h/a

Anlage nach Stand der Technik

Betriebstüchtigkeit technisch und wirtschaftlich über 3 Jahre nachgewiesen

Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach TA Luft

Als Brennstoffe kommt nur naturbelassene Biomasse zum Einsatz:

- Sägerestholz
- Rinde
- Landschaftspflegeholz
- Altholz der Klasse A I, ggf. qualitätsgesichertes A II

Aus Kostengründen kommt in dieser Anlage als Regelbrennstoff nur naturbelassene Biomasse zum Einsatz, eine Ausrüstung gemäß den Anforderungen der 17. BImSchV ist bei dieser Anlagenleistung nicht rentabel. Als Dampferzeuger wird ein Großwasserraumkessel mit einem Druck von ca. 26 bar, Überhitzung 450 °C, eingesetzt. Die gewählte Dampfturbine, Bauart Reaktionsturbine, weist einen für diese Anlagenleistung hohen Wirkungsgrad auf. Die Genehmigung der Anlage erfolgt nach den Anforderungen der (neuen) TA Luft.

Der Vergleich von „Groß-,“ und „Kleinanlage“ ist aus ökologischer Sicht interessant, da die Anzahl der potenziellen Standorte mit (prozentual) hoher Wärmeauskopplung bei kleineren Leistungen sehr viel wahrscheinlicher ist. Über das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung kann damit ein wesentlich höherer Brennstoffausnutzungsgrad erreicht und damit der zur Verfügung stehende, CO<sub>2</sub>-neutrale, Brennstoff „Biomasse“ ökologisch besser ausgenutzt werden.

## 4 Bewertung der Systeme

Die zur Verfügung stehenden Technologien wurden für die 42 MW-Anlage eingehend betrachtet und sowohl technisch als auch wirtschaftlich untersucht. Der nachfolgenden Gegenüberstellung liegen konkrete Angebote von Anlagenherstellern zu Grunde. Auf Grund der Seriosität der Anfrage (z.B. Art und Unternehmensgröße des Bauherrn), des Potenzials für den Lieferanten (mehrere Standorte) und insbesondere der gegebenen Wirtschaftlichkeit des Konzeptes dürften die Angebote belastbar und repräsentativ für nachfolgende Bewertung sein.

Einige der zur Bewertung relevanten Parameter wurden bereits in Kapitel 3 genannt. Für die Systeme Rostfeuerung, Wirbelschichtfeuerung und Vergasung wurde eine Matrix entwickelt, so dass als Endergebnis eine rein wirtschaftliche

Bewertung der Technologien erfolgen kann. Dabei werden bei der Erfassung der Technik und der Qualität der eingesetzten Technik unterschiedliche Gewichtungen eingeführt.

Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV ist zwingend vorgeschrieben. Sollte eine eingesetzte Technologie diese Werte nicht erreichen, führt dies nahezu zwangsläufig zum Ausschluss des Verfahrens. Das gleiche gilt für besondere Risikofaktoren. Die Gewichtung für Leistungsdaten und Verbräuche von Betriebsmitteln, welche einer gesonderten Gewährleistung unterliegen, ist ebenfalls sehr hoch. Die Ermittlung der Wartungskosten ist dabei sicherlich subjektiv und vom Betrachter abhängig. Als Richtgröße für einen Vergleich werden weiterhin Angebote über Wartungsverträge herangezogen. Eine „Objektivität“ erreicht man erst, in dem bei Abschluss der Bewertung die einzelnen Gewichtungsfaktoren verändert werden, so dass sich „theoretisch“ die Reihenfolge der Technologien ändern kann.

Beispielhafter Kriterienkatalog inkl. Gewichtung für die Bewertung von Angeboten:

Unternehmen (Größe, Art, Mitarbeiter, etc.)	10	%
Referenzen (Leistung, Anzahl, Brennstoffart, etc.)	20	%
Wirtschaftlichkeit	30	%
Angebotsunterlagen	5	%
Gewährleistungsdaten (Leistungen, Verbräuche, etc.)	20	%
Maschinenteknik	10	%
Ausführungsfrist	5	%

Diese Punkte bestehen aus einer Vielzahl an Unterpunkten, wobei jeder für sich ein „KO-Kriterium“ sein kann. Die Gewichtungsfaktoren werden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen. Die folgenden Tabellen enthalten eine Zusammenfassung der technischen und z.T. wirtschaftlichen Daten.

Die für die Vergasungstechnologien angegebenen Daten der Hersteller unterscheiden sich stark, widersprechen sich teilweise und sind aus diesem Grund nur schwer in dieser Matrix bewertbar. Der wesentliche Unterschied zwischen Rost- und Wirbelschichtfeuerung besteht bei der Art der erforderlichen Brennstoffaufbereitung. Bei einigen Rostfeuerungssystemen ist nur eine Grobzerkleinerung auf eine Kantenlänge von 350...500 mm erforderlich. Anhaftende Metallteile werden durch die Verbrennung getrennt. Dies ist bei einer Wirbelschichtfeuerung i.d.R. nicht möglich. Der Brennstoff muss nachzerkleinert werden. Dies führt zu einer Minderung der Betriebskosten bei einer Rostfeuerung (Ausnahme Wanderrost), wenn die gesamte Logistikkette von der Altholzannahme bis zur Feuerung optimiert werden kann. Die optimale Lage der Altholzannahme und Aufbereitung wäre direkt am Standort der Feuerungsanlage, so dass ein weiterer

Umschlag der Brennstoffe entfällt und diese nur so weit erforderlich aufbereitet werden müssen. Sollte dies nicht der Fall sein und der Brennstoff bereits zerkleinert zur Verfügung stehen, wären die Differenz der Aufbereitungskosten für Rost- und Wirbelschichtfeuerung geringer.

	ROSTFEUERUNG	WIRBELSCHICHT	VERGASUNG
Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringer Aufbereitungsaufwand 10...15 EUR/Mg</li> <li>+ breite Kornverteilung Korngröße &lt;350 mm Feinant. &lt;1 mm: max. 10%</li> <li>+ Schwankungen im Wassergehalt möglich Wassergeh. 10...40 % &lt;10 % Rezi erforderlich</li> <li>+ unempfindlich gegen Störstoffe (&lt;3 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbereitung notwendig ca. 30 EUR/Mg</li> <li>- gleichmäßige Körnung Korngröße &lt;80 mm Feinant. &lt;1 mm: max. 3%</li> <li>○ gleichmäßiger Wassergehalt Wassergeh. 20...40 % &lt;20 % Bettkühlung</li> <li>○ empfindlich gegen Störstoffe (&lt;1 %)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbereitung je nach Verfahren notwendig bis 35 EUR/Mg</li> <li>- gleichmäßige Körnung Korngröße &lt;50 bis 350 mm Feinant. verfahrensabh.</li> <li>○ gleichmäßiger Wassergehalt verfahrensabhängig</li> <li>○ teils empfindlich gegen Störstoffe (&lt;1 %)</li> </ul>
Aschequalität	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ guter Ausbrand</li> <li>+ flexible Verwertung Rostascheanteil 80 % Flugaschen 20 %</li> <li>+ niedrige Entsorgungskosten Rostasche 10-40 EUR/Mg Flugasche 50-150 EUR/Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>++ sehr guter Ausbrand</li> <li>- Verwertung bedingt Rostascheanteil 0 % Flugaschen 100 %</li> <li>- hohe Entsorgungskosten Bettasche: abh. vom Brennstoff Flugasche 50-150 EUR/Mg</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ausbrand nach Bauart</li> <li>+ flexible Verwertung Ascheanfall je nach Bauart</li> </ul>
Kesselkonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>FWL 10-60 MW</li> <li>+ Teillastverhalten 40-100 %</li> <li>○ 17. BImSchV 70-100 %</li> <li>+ Wirkungsgrad 88,5 %</li> <li>++ hohe Verfügbarkeit 8000 h (Garantie)</li> <li>+ Referenzen 10-20 MWel &lt; 10 Anlagen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FWL 30-150 MW</li> <li>○ Teillastverhalten 70-100 %</li> <li>○ 17. BImSchV 70-100 %</li> <li>++ Wirkungsgrad 90,0 %</li> <li>+ hohe Verfügbarkeit 8000 h (Herstellerangabe)</li> <li>+ Referenzen 10-20 MWel &lt; 5 Anlagen, kein Altholz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht zutreffend bauartspezifisch</li> <li>bauartspezifisch</li> <li>- geringe Verfügbarkeit &lt; 4.000 h</li> <li>-- Referenzen 10-20 MWel keine</li> </ul>
elektrischer Eigenbedarf	<ul style="list-style-type: none"> <li>++ ca. 10 % der installierten Leistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ ca. 15 % der installierten Leistung bei ZWS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bauartabhängig</li> </ul>
Technik	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Überhitzungstemperatur &lt; 430 °C (Korrosionsdiagramm)</li> <li>○ Zwischenüberhitzung denkbar, keine Referenz</li> <li>○ Luftvorwärmung nur begrenzt möglich</li> <li>+ Reaktionszeit Feuerung mittel</li> <li>+ Laständerungsgeschw. 2-4 %/min</li> <li>+ Automatisierung TRD 604 möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Überhitzungstemperatur &lt; 430 °C (Korrosionsdiag.) höhere Temp. möglich bei ZWS, aber Erosionsgefahr</li> <li>○ Zwischenüberhitzung denkbar, keine Referenz</li> <li>○ Luftvorwärmung nur begrenzt möglich</li> <li>++ Reaktionszeit Feuerung niedrig</li> <li>++ Laständerungsgeschw. 6-8 %/min</li> <li>+ Automatisierung TRD 604 möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht zutreffend</li> <li>nicht zutreffend</li> <li>je nach Bauart</li> <li>nicht zutreffend</li> <li>je nach Bauart</li> <li>- Automatisierung keine Referenz</li> </ul>

Abb. 2: Vergleich von Feuerungsarten, Teil 1



	ROSTFEUERUNG	WIRBELSCHICHT	VERGASUNG
Einhaltung 17. BImSchV	+ niedrige CO-Emissionen  + niedrige NOx-Emissionen SNCR-Verfahren	++ sehr niedrige CO-Emissionen  + niedrige NOx-Emissionen SNCR-Verfahren	○ je nach Ausführung
Investitionskosten	+ 2.300 EUR/MW <sub>el</sub> (10 MW) 2.150 EUR/MW <sub>el</sub> (12 MW) 2.050 EUR/MW <sub>el</sub> (15 MW) 2.050 EUR/MW <sub>el</sub> (20 MW)	- 2.550 EUR/MW <sub>el</sub> (10 MW) 2.500 EUR/MW <sub>el</sub> (12 MW) 2.425 EUR/MW <sub>el</sub> (15 MW) 2.300 EUR/MW <sub>el</sub> (20 MW)	- keine generelle Aussage möglich
Wartung und Instandhaltung Feuerung / Dampferzeuger	+ ca. 2 % der Investkosten	○ ca. 3 % der Investkosten	bauartabhängig

Abb. 3: Vergleich von Feuerungsarten, Teil 2

## 5 Optimierungspotenziale

Auf Grund der Komplexität der Anlagentechnik sollen nur einige für die Wirtschaftlichkeit wesentliche Potenziale aufgezeigt werden. Hierzu gehört insbesondere der elektrische Wirkungsgrad, da die Vergütung des eingespeisten Stromes i.d.R. der Hauptanteil der Gesamterlöse ist. Weitere Erlöse können durch eine Wärme- (oder Kälte-) –lieferung als auch durch die Annahme von Altholz erzielt werden. Gerade die Wärmelieferung spielt jedoch bei den meisten Standorten nur eine wirtschaftlich untergeordnete Rolle, da die Wärmeauskopplung immer zu Lasten der Stromproduktion geht. Die aus dem Stromverkauf erzielbaren Erlöse sind jedoch auf Grund des EEG so hoch, dass die Fernwärmelieferung an industrielle Abnehmer mit hohen Volllaststunden zu Preisen erfolgen muss, die unter dem Äquivalenzpreis für die Stromerzeugung liegen können. Weiterhin müssen die zusätzlichen Kosten des Wärmenetzes inkl. Hydraulik berücksichtigt werden. Hierzu gehören:

- Kapitalgebundene Kosten
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Strom für Netzpumpen
- Netzverluste
- Versicherungskosten

Um die Stromerzeugung optimieren zu können, werden unterschiedliche Wasser-Dampf-Kreisläufe durchgerechnet. Es wird ein Wasser-Dampf-Kreislauf mit folgenden Rahmendaten angenommen:

Dampfdruck Dampferzeuger	63 bar
Überhitzungstemperatur	430 °C
Speisewassertemperatur	120 °C
Abdampfdruck nach Dampfturbine	0,12 bar
Zweistufige Regenerative Speisewasservorwärmung auf	190 °C
Elektrischer Wirkungsgrad	27,7 %

Um Korrosion im Bereich von Überhitzer und Economizer zu vermeiden, werden Überhitzungs- und Speisewassertemperatur gegenüber einem „normalen“, naturbelassenen Brennstoff reduziert bzw. erhöht.

Auf Grund der hohen regenerativen Speisewasservorwärmung auf 190 °C steigt die Abgastemperatur am Kesselende auf ca. 240 °C. Damit wäre ein relativ hoher Abgasverlust verbunden, mit dem der oben genannte elektrische Wirkungsgrad nicht zu erreichen wäre. Die weitere Abkühlung des Abgases findet in einem Rauchgas- / Wasser-Wärmetauscher statt, der im Kondensatrücklauf (ca. 50 °C) eingebunden wird. Bei dieser Anlagenschaltung ergibt sich das Problem, dass der im Kondensat-Rücklauf angeordnete Wärmetauscher im Taupunkt einiger Schadstoffkomponenten betrieben wird und damit als Glasröhren-Wärmetauscher ausgerüstet sein müsste. Weiterhin ist die Steigerung des Dampfdruckes von 63 auf z.B. 80 bar ohne Anhebung der Temperatur und damit eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades nicht möglich, da der Dampf am Austritt der Dampfturbine bereits eine Endnässe von 12,8 % aufweist.

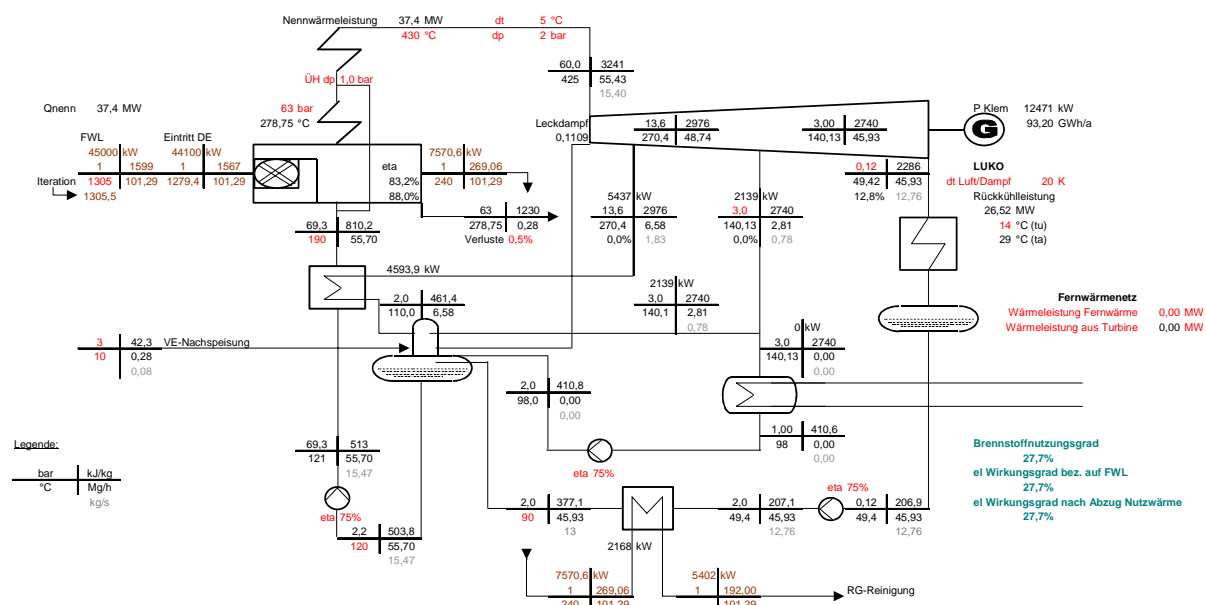


Abb. 4: Wasser-Dampf-Kreislauf mit Glas-Röhren-Wärmetauscher

Um vor allem die betrieblichen Probleme mit dem Glasröhren-Wärmetauscher zu vermeiden, erfolgt die Aufwärmung des Kondensates durch eine dritte Anzapfung / Entnahme. Weiterhin wird der Wasser-Dampf-Kreislauf dahingehend geändert, dass das Speisewasser dem Dampferzeuger direkt aus dem Speisewas-

serbehälter (120 °C) zugeführt wird. Damit wird eine niedrige Abgastemperatur von ca. 170 °C erreicht. Um jedoch weiterhin eine regenerative Speisewasservorwärmung realisieren zu können (bei einer Druckstufe von ca. 16 bar), wird das Speisewasser nach einer ersten Aufwärmung im Dampferzeuger in einem weiteren Wärmetauscher mit Dampf beheizt, um danach wieder in den Dampferzeuger geleitet zu werden. Diese Anordnung wäre bei der Auslegung des Dampferzeugers zu berücksichtigen. Mit dieser Schaltung werden zum einen Korrosionsprobleme vermieden, zum anderen kann der elektrische Wirkungsgrad auf 28,6 % gesteigert werden.

Eine weitere Optimierung kann bei Realisierung einer Zwischenüberhitzung erfolgen: Dies wurde bisher bei Anlagenleistungen dieser Größenordnung nur selten durchgeführt, Betrachtungen von Dampfturbinenherstellern haben jedoch gezeigt, dass diese wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Ein großer Vorteil der Zwischenüberhitzung ist, dass der Dampfdruck auf z.B. 83 bar bei gleicher Überhitzungstemperatur angehoben werden kann und die Endnässe des Dampfes nur 6,6 % beträgt. Damit steigt das in der Dampfturbine zur Verfügung stehenden Enthalpiegefälle an. Die Dampfturbine wird so aufgebaut, dass bei einem Dampfdruck von z.B. 16 bar der gesamte Dampf (mit Ausnahme des Dampfbedarfes für die regenerative Speisewasservorwärmung) wieder überhitzt wird. Bei einer Erhöhung der Dampftemperatur von ca. 240 °C auf 370 °C kann somit bereits ein elektrischer Wirkungsgrad von 29,7 % erreicht werden.

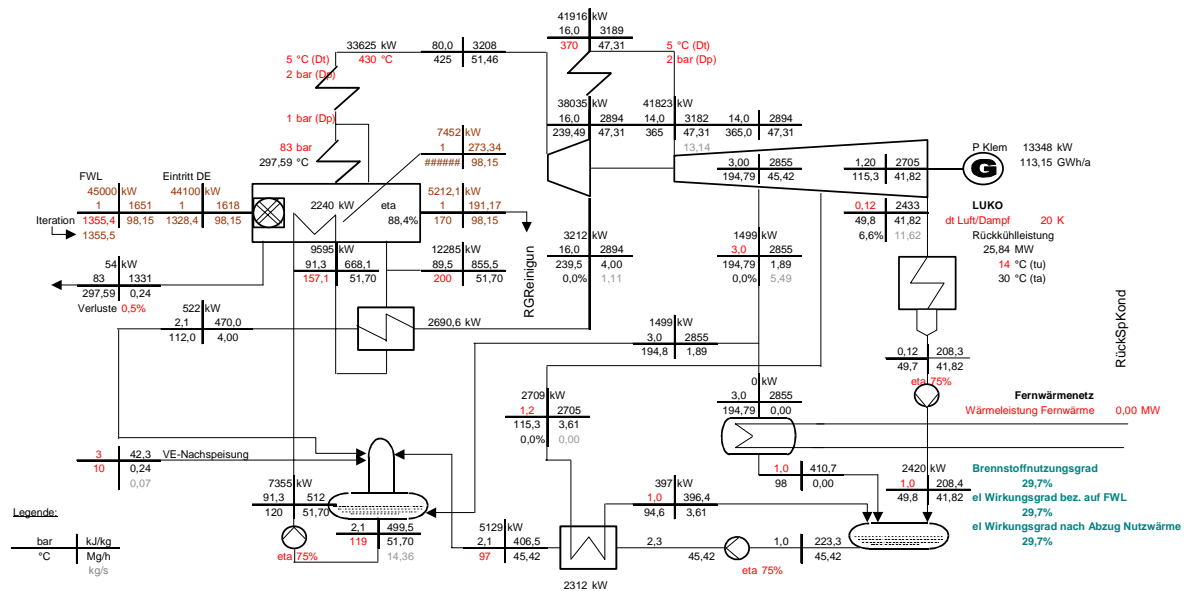


Abb. 5: Optimierter Wasser-Dampf-Kreislauf mit Zwischenüberhitzung

Die aufgezeigten Optimierungspotenziale von jeweils ca. einem Prozentpunkt sehen niedrig aus. Setzt man diese jedoch in das Verhältnis zur Wirtschaftlichkeit bzw. zu den damit zulässigen höheren Investitionskosten, zeigt sich sehr deutlich das wirtschaftliche Potenzial. Bei einer Einspeiseleistung von 12 MW liegen die jährlichen Erlöse bei ca. 7,9 Mio. EUR. Eine absolute Steigerung von

einem Prozentpunkt entspricht einer relativen Steigerung von ca. 3,5 % (bezogen auf die Basis von 27,7 %). Die elektrische Klemmenleistung steigt um ca. 420 kW. Bei einer zusätzlichen Einspeisemenge von 3.150 MWh/a liegt der Mehrerlös bei knapp 280 T EUR und damit bei einer möglichen zusätzlichen Investition, abhängig von Zins und Abschreibungsdauer, von ca. 3 Mio. EUR. Der Mehraufwand liegt jedoch i.d.R. unter dem erzielbaren Mehrerlös.

Mit Hilfe dieser kurzen Abschätzung wird deutlich, welche Bedeutung der Stromerzeugung und dem daraus entstehenden Erlös zukommen. Doch darüber hinaus können weitere Optimierungen durch Reduzierung von Betriebs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die Erhöhung der Verfügbarkeit erzielt werden. Dabei müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Störungen an Komponenten / Aggregaten führen zum Abfahren der Gesamtanlage?
- Stehen die Kosten für redundante bzw. aufwändigere Anlagen zur Vermeidung des Anlagenstillstandes im Verhältnis zum entgangenen Erlös oder zu vermiedenen Kosten?

Folgende Beispiele für die singuläre Fehlerbetrachtung sollen genannt werden:

#### Brennstoffbeschickung

Die meisten Anlagenstillstände werden durch Störungen in der Beschickung hervorgerufen. Die Art der Beschickung und das Brennstoffband müssen aufeinander abgestimmt werden. Ein Anlagenstillstand kann durch entsprechende Auslegung von Fördereinrichtungen, ein Vorlagesilo oder eine Notaufgabe erreicht werden.

#### Verschmutzung der Heizflächen

Alle Heizflächen sollten mit ähnlichem Aufwand gereinigt werden.

#### Anlagenverfügbarkeit

Komponenten wie z.B. die Rauchgasreinigung sollten höhere Verfügbarkeiten und Reisezeiten als Feuerung und Dampferzeuger aufweisen.

#### Redundanz

Aggregate, die kürzeren Wartungsintervallen unterliegen, sollten redundant ausgeführt werden (z.B. heißgehende Schnecken, Pumpen für kritische Medien). Redundanz bzw. ein Notsystem sollte auch für Regelstrecken (Kondensat, Dampf) vorhanden sein. Hierbei ist der Einsatz von manuellen Drosselventilen als Redundanz möglich, so dass die Anlage weiter betrieben werden kann.

## Steuerungs- und Leittechnik (SLT)

Eine manuelle Sollwertvorgabe bei Ausfall eines Regelgliedes sollte möglich sein. Die Aufteilung der SLT erfolgt in diverse Black-Boxen.

Die Korrosionsproblematik an den Überhitzerschaltflächen wird durch folgende Parameter beeinflusst:

- Rauchgastemperatur beim Eintritt in das erste Überhitzerpaket
- Überhitzerschaltung
- Feuerungsleistungsregelung
- Verschmutzung
- Reinigung

Der Einfluss der Rauchgastemperatur auf das Korrosionsverhalten des Überhitzers kann in einem Korrosionsdiagramm gezeigt werden:

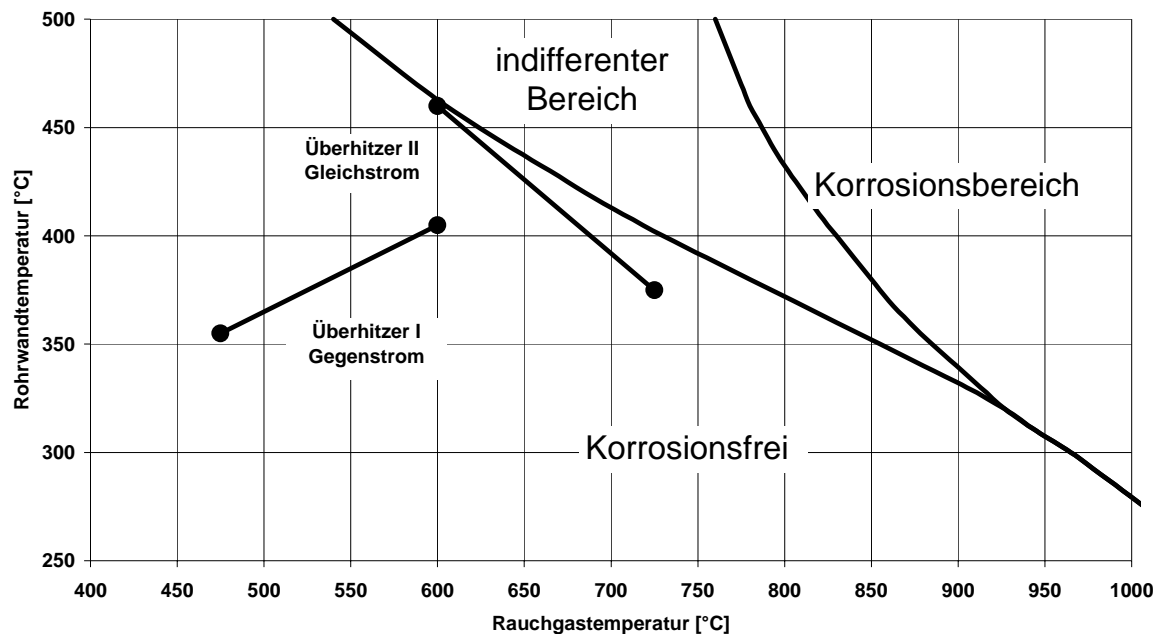


Abb. 6: Flingsches Korrosionsdiagramm

Für das Erreichen einer Überhitzungstemperatur von 430 °C muss Überhitzer II bereits im Gleichstrom geschaltet werden, was zu größeren Wärmetauscherflächen aber einem korrosionsfreien Betrieb führt.

## 6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Sensitivitätsanalyse

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird nach VDI 2067 aufgebaut und bezieht sich auf das in diesem Fall wirtschaftlich günstigste Verfahren, eine Rostfeuerung. Damit werden Kapitalgebundene, Betriebsgebundene (Personal, Wartung), Verbrauchsgebundene (Strom, Heizöl, Wasser, Sorbentien, Brennstoff, Entsorgung, sonstige Betriebsmittel), sonstige Kosten (Versicherung, Verwaltung) und Erlöse (Strom) in einzelnen Gruppen erfasst.

Die Investitionskosten wurden an Hand der Herstellerangebote zzgl. Nebenkosten ermittelt. Dabei ergab sich folgendes Bild:

Rostfeuerung	26,59 Mio. €
	2.062 €/kWel
Wirbelschichtfeuerung	35,8 Mio. €
	2.600 €/kWel
Vergasungsverfahren	43,5 Mio. €
	3.174 €/kWel

Die Rostfeuerung liegt bei den Investitionskosten vor den anderen Anlagenkonzepten. Das Ergebnis wird noch dadurch bestätigt, dass die Anbieter der Rostverfahren auf vergleichbarem Preisniveau liegen. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass ein Up-Scaling bei einer Rostfeuerung von 12 MW auf 20 MW elektrisch zu keiner nennenswerten Einsparung führt. Dies liegt daran, dass bei einer Rostfeuerung bei einer Anlagengröße von 20 MW el. bereits 2 Linien oder ggf. eine Wanderrostfeuerung mit aufwändigerer Brennstoffkonditionierung errichtet werden müssen.

Die Kapitalkosten wurden dabei, um die Wartungskosten adäquat erfassen zu können, nach Einzelkomponenten aufgeteilt. Nachfolgend werden die Hauptgruppen, erläutert am Beispiel der Rostfeuerung, zusammengefasst:

Maschinentechnik	19,97 Mio. €
Elektrotechnik	1,12 Mio. €
Bautechnik	2,71 Mio. €
Haustechnik	0,77 Mio. €
Projektvorbereitung, Planung	0,74 Mio. €
Grundstück	1,12 Mio. €

Bei der Ermittlung der Gesamtbetriebskosten und Erlöse wurde soweit als möglich auf Hersteller- oder Betreiberangaben zurückgegriffen. Technische und wirtschaftliche Bewertung erfolgen dabei Hand in Hand. Jedes Verfahren muss erst für sich optimiert werden, bevor es mit den anderen verglichen werden

kann. Um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verfahren bzw. Technologien zu beurteilen, werden die Grenzkosten für den Brennstoff Holz bei einem Jahresüberschuss von 0 DM berechnet. Ein Jahresüberschuss von 0 DM bedeutet in diesem Fall, dass nur der Kapitaleinsatz (Zins und Tilgung) gedeckt, aber kein Gewinn erzielt wird. Damit ergeben sich ungefähr folgende Grenzkosten:

Rostfeuerung	24,0	€t
Wirbelschichtfeuerung	1,5	€t
Vergasungsverfahren	- 15,8	€t

Für das Vergasungsverfahren ergeben sich negative Grenzkosten, das bedeutet, dass bei der Brennstoffaufnahme ein Erlös erzielt werden muss. Bei der Ermittlung dieser Grenzkosten wurden für die Wirbelschichtfeuerung zusätzliche Aufbereitungskosten in Höhe von 10 €t zu Grunde gelegt.

Folgende Rahmenparameter wurden bei der Ermittlung der Kapitalkosten zu Grunde gelegt:

42 MW-Anlage:

Abschreibungszeitraum	12	a
Kapitalzins	7	%
Investitionsvolumen (52 Mio. DM)	26,59	Mio. €

10 MW-Anlage:

Abschreibungszeitraum	15	a
Kapitalzins	6	%
Investitionsvolumen (12,7 Mio. DM)	6,48	Mio. €

Der verlängerte Abschreibungszeitraum und die niedrigeren Zinsen bei der 10 MW-Anlage werden mit dem geringeren Risiko bei der Brennstoffbeschaffung (Mengen sind kleiner!) und dem Potenzial einer möglichen Wärmeauskopplung in adäquater Größenordnung (zweites wirtschaftliches Standbein) begründet. Ein Erlös für den Verkauf von Fernwärme ist in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht enthalten.

Anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der wichtigsten Parameter auf die Wirtschaftlichkeit interpretieren zu können. Dies führt zu folgenden Diagrammen:

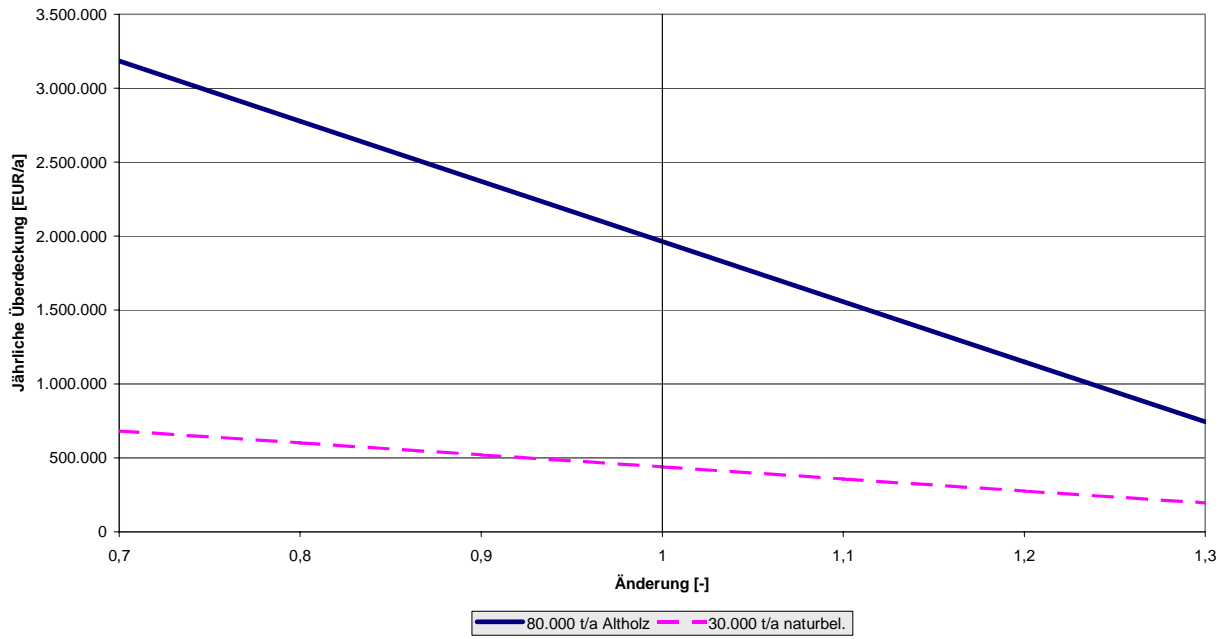


Abb. 7: Sensitivität in Abhängigkeit von den Investitionskosten

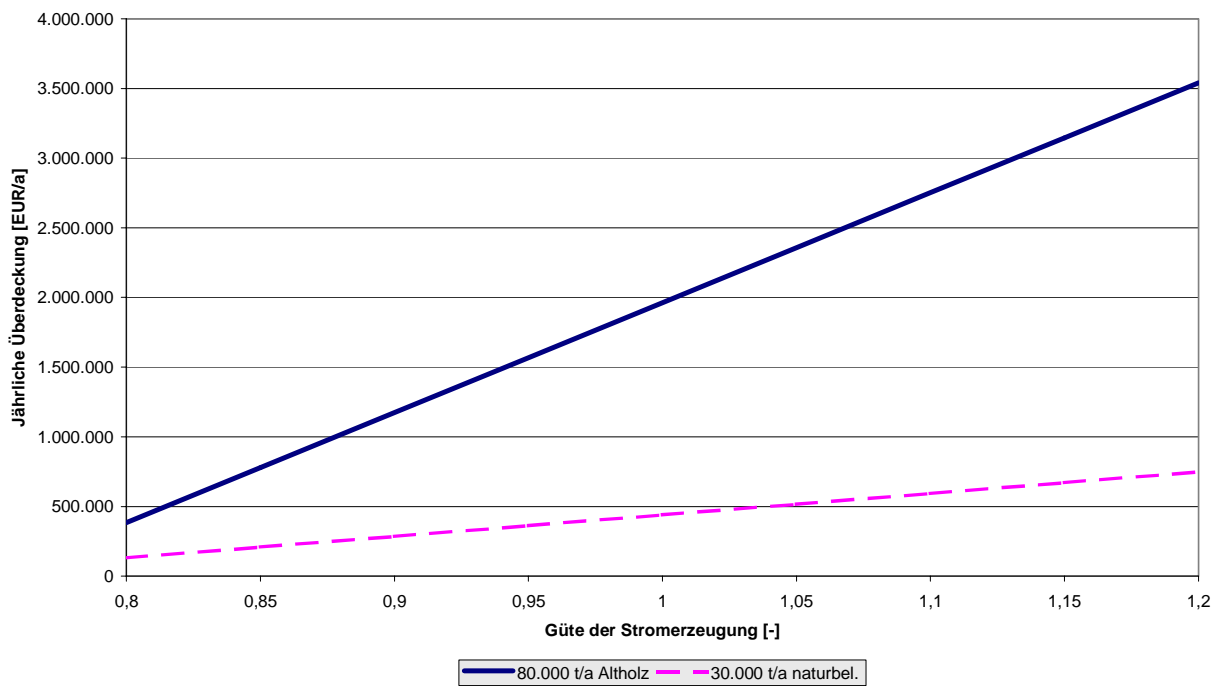


Abb. 8: Sensitivität in Abhängigkeit von der Güte der Stromerzeugung



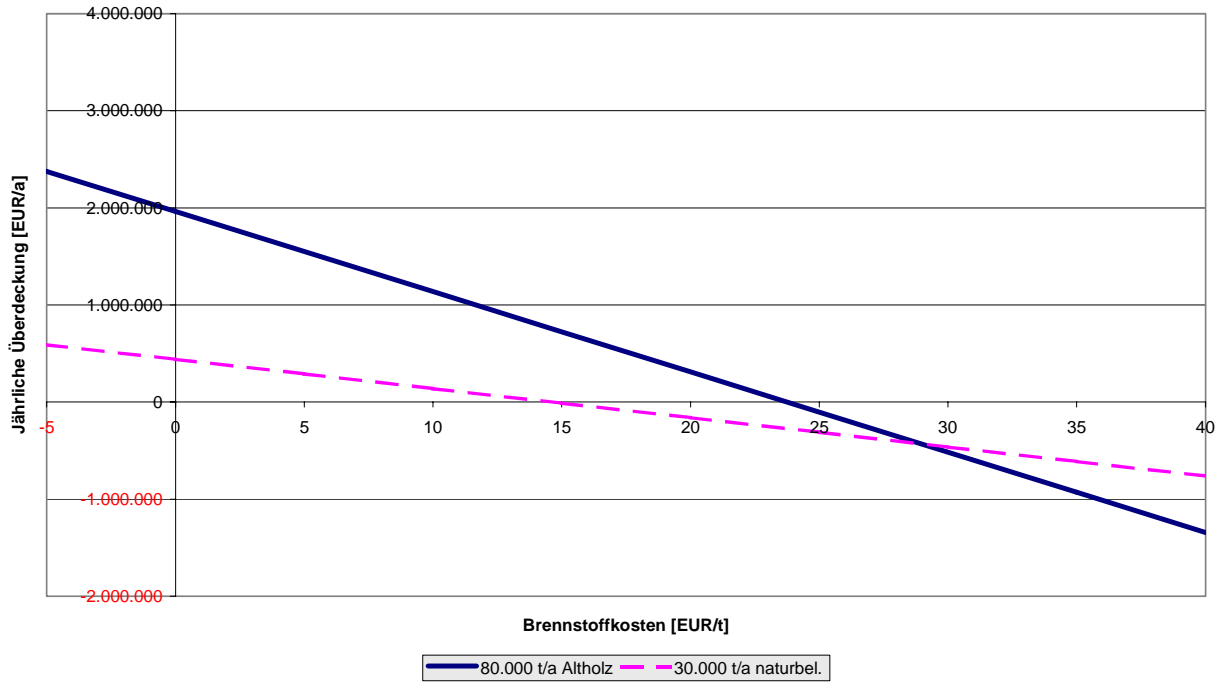


Abb. 9: Sensitivität in Abhängigkeit von den Brennstoffkosten

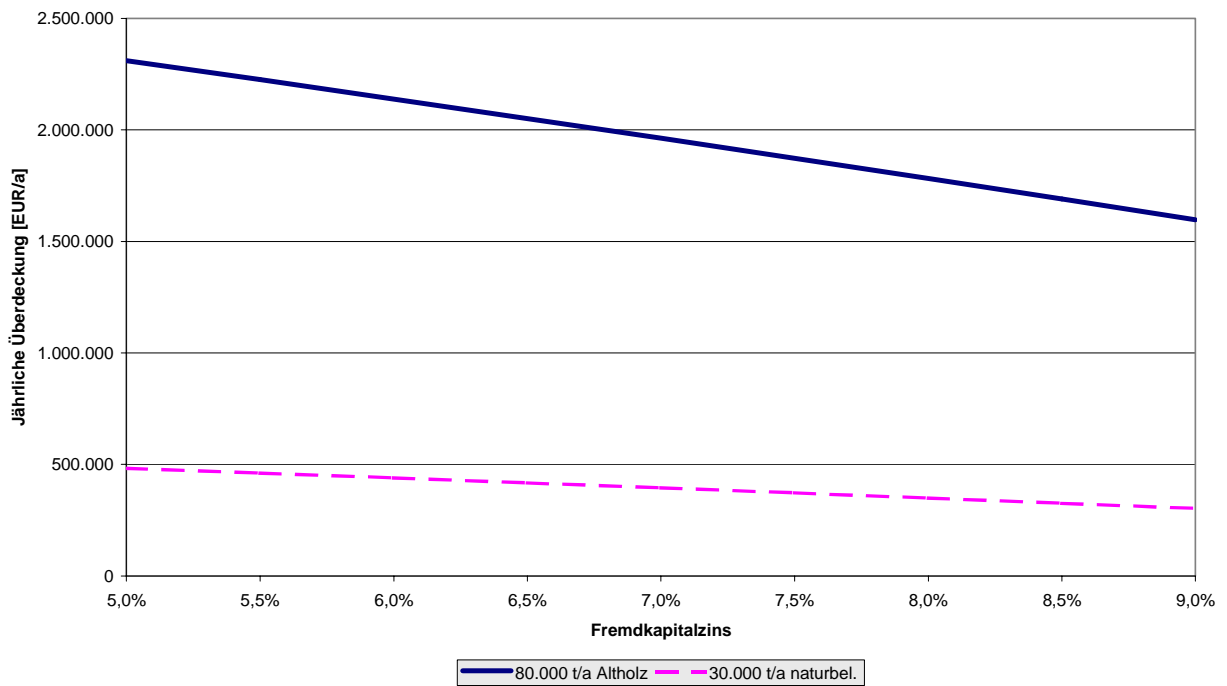


Abb. 10: Sensitivität in Abhängigkeit vom Kapitalzins