

Digitalisierung macht die Energieproduktion effektvoller und führt zusätzlich zu erheblichen Energieeinsparungen.

Philip Modler, Bernd Sankol, Hiren Gandhi

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Verschmutzung des Wärmeübertragungsapparates	3
2.1	Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten	5
2.2	Einfluss auf den Luftmassenstrom	6
2.3	Bedeutung für den Kraftwerksprozess	6
2.4	Definition des Gütefaktors	7
2.5	Einordnung des Gütefaktors	9
2.6	Die automatisierte Reinigungsanlage	10
3	Verlust durch Verschmutzung in der Praxis	11
4	Fazit	15
5	Literaturverzeichnis	16

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Oberfläche der berippten Seite	m^2
k	Wärmedurchgangskoeffizient des Kondensators	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\Delta\vartheta_M$	Mittlere Temperaturdifferenz	K
ϑ_K	Temperatur des Kondensats	$^{\circ}C$
ϑ_U	Temperatur der Umgebungsluft/Temperatur der Luft am Eintritt des Kondensators	$^{\circ}C$
ϑ_{Abluft}	Temperatur der Abluft	$^{\circ}C$
x	Dampfgehalt	–
\dot{Q}	Wärmestrom des Kondensators an die Umgebung	W
R_f	Foulingwiderstand	$\frac{m^2 \cdot K}{kW}$
\dot{m}_D	Dampfmassenstrom durch den Kondensator	$\frac{kg}{s}$
Symbol	Bedeutung	Einheit

r	Verdampfungsenthalpie bei der im Kondensator herrschenden Temperatur	$\frac{kJ}{kg}$
$c_{p,Luft}$	Spezifische Wärmekapazität der Umgebungsluft	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
f_{Luft}	Abweichung des Luftmassenstroms vom idealen Zustand	–
F_G	Abweichung der mittleren Temperaturdifferenz vom idealen Zustand	–
G	Gütefaktor	–
θ	Betriebscharakteristik	–
\dot{C}_{Luft}	Wärmekapazitätsstrom der Luft	$\frac{W}{K}$
\dot{C}_D	Wärmekapazitätsstrom des Dampfes	$\frac{W}{K}$

1 Einleitung

Fouling ist in der Prozesstechnik ein dauerhaftes Problem. Aufgrund von Ausfall- und Wartungskosten sowie Effizienzverlusten und Überdimensionierung führte Fouling im Jahr 1985 Schätzungen zufolge in industrialisierten Ländern zu Kosten in Höhe von 0,25% des Bruttosozialproduktes [1]. Auch berippte luftgekühlte Wärmeübertragungsapparate, welche in der Industrie häufig eingesetzt werden, um Abwärme an die Umgebung abzugeben sind davon betroffen. Sie arbeiten mit unbehandelter Außenluft und sind deshalb sowohl natürlichen (z.B. Pollen) als auch menschgemachten (z.B. Industriestaub) Verschmutzungen ausgesetzt. [2]

Es wird über die Ergebnisse eines neu entwickelten, digital gestützten Verfahrens zur energetischen Optimierung des Betriebes von Lamellenwärmeübertragungsapparaten zur Kühlung mittels Luft in der Industrie berichtet.

Für einen energieeffizienten Betrieb ist dabei der Grad der Verschmutzung eines Wärmeübertragungsapparates mit Lamellen von erheblicher Bedeutung. Er setzt an gleich zwei Stellen zur Verringerung der Wärmeabgabe an: Ist die Oberfläche verschmutzt, ist der Wärmedurchgangskoeffizient k reduziert, seine Übertragungsleistung ist geringer. Zusätzlich setzt starke Verschmutzung die Räume zwischen den sehr eng stehenden Lamellen zu, damit verringert sich die durchströmte Fläche signifikant, der Druckverlust steigt.

Wann eine - aufwendige und kostspielige - Reinigung notwendig ist, wird bisher in der Praxis nach Augenschein beurteilt. Das Verfahren ist umständlich und ungenau. Da die Reinigung eines Industrie-Lamellenwärmeübertragungsapparates aufwendig und kostspielig ist, ist für eine optimale Betriebsführung von großer Bedeutung, den Grad der Verschmutzung, ihre

Wirkung auf den Wärmedurchgang, den Betrieb der Gesamtanlage und damit den günstigsten Zeitpunkt für eine Reinigung verlässlich zu bestimmen. Dies ist bislang schwierig, die permanente Überwachung ist oft aufwendig. Die Beurteilung der Verschmutzung kann derzeit z.B. durch eine Volumenstrommessung an einem kleinen Teil des Wärmeübertragungsapparates durchgeführt werden. Zudem wird oft die Vor- und Rücklauftemperatur erfasst. Das bisher hier eingesetzte Equipment ist aufwendig, trotzdem bleiben die Messungen ungenau und erlauben keine optimale Reinigung.

Für die Festlegung des optimalen Zeitpunktes für eine Reinigung aus Energie- und Kostensicht wurde ein System, ControlMaster, entwickelt und an einem Luftkondensator nach einer Turbine eingesetzt. Das Optimum wird nach energetischer Sicht festgelegt, gleichzeitig aber entsteht ein sehr großer Kostenvorteil durch die Einsparung. ControlMaster nutzt neueste digitale Technologien und setzt hier mit einem neuen, selbstlernenden Mess- und Auswertungsverfahren an. Das Verfahren ermittelt den besten Reinigungszeitpunkt zur optimalen Energieeffizienz eines Wärmeübertragungsapparates. Die dafür benötigten Daten werden kontinuierlich erfasst, über eine Funkstrecke zum Rechner übermittelt, dort gespeichert und mit komplexen Algorithmen digital bewertet. Mit diesem System werden die sich verändernden Energieverbräuche abgeglichen mit dem Aufwand, den eine Reinigung des Wärmeübertragungsapparates verursachen würde, so wird der energetisch optimale Zeitpunkt einer Reinigung bestimmt.

2 Verschmutzung des Wärmeübertragungsapparates

Luftgekühlte Kondensatoren verwenden Umgebungsluft, um dem zu kühlenden Medium die Wärme zu entziehen. Im Laufe eines Jahres unterliegt die Temperatur der Umgebungsluft starken Schwankungen. Wegen der hohen Investitionskosten kann der Kondensator nicht auf die Jahreshöchsttemperatur ausgelegt werden. Es wird häufig der Kompromiss geschlossen, als Auslegungstemperatur den Jahresmittelwert der Umgebungstemperatur für den Standort zu nehmen. Dadurch ist der Kondensator die eine Hälfte des Jahres über- und die andere Hälfte unterdimensioniert. Der untersuchte Kondensator wurde beispielsweise auf eine Umgebungstemperatur von 12 Grad Celsius ausgelegt.

Bei der Auslegung von Wärmeübertragungsapparaten, wird für die Verschmutzung zusätzliche Fläche eingeplant. Dies geschieht meistens über den Fouling-Faktor [3]. Zusätzlich gibt der Hersteller einen Reinigungszyklus vor. Im Beispiel des untersuchten Kondensators werden zwei Reinigungen im Jahr empfohlen. Diese Reinigungen fanden oft am Anfang und am Ende

des Sommers statt. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass die Bedingungen abhängig vom Standort stark variieren können.

Der Wärmeübergangskoeffizient von strömender Luft [4] ist verglichen mit dem dampfseitigen bei der Kondensation auftretenden Wärmeübergangskoeffizienten [5] sehr niedrig. Deshalb ist luftseitig eine große Übertragungsfläche erforderlich. Allerdings führt eine große Oberfläche auch dazu, dass sich Partikel schneller absetzen können. Luft wird von Ventilatoren aus der direkten Umgebung angesaugt und unbehindert durch die Lamellen gedrückt. Die von dieser Luft transportierten Schwebstoffe, wie beispielsweise Pollen oder Staub, setzen sich mit der Zeit an der Oberfläche des Wärmeübertragungsapparates ab und bilden eine wachsende Isolierschicht. Durch diese Isolierschicht steigt der Strömungswiderstand für die Luft, wodurch die Ventilatoren bei gleicher Leistung weniger Luft durchdrücken können.

Die Ventilatoren müssen durch die Verschmutzung mehr Leistung aufbringen, um den erforderlichen Luftmassenstrom zu erzeugen. Diese sind im saubereren Zustand, durch die niedrige Auslegungstemperatur des Kondensators, bereits bei Umgebungstemperaturen von ca. 14 Grad Celsius voll ausgelastet. Bei höheren Umgebungstemperaturen kann die Leistung der Ventilatoren nicht mehr erhöht werden, um den Einfluss der Verschmutzungen zu kompensieren.

Die Abhängigkeit des durch den Kondensator übertragenen Wärmestroms von den Einflussgrößen, wird in der Grundgleichung für Wärmeübertragungsapparate beschrieben:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_M \quad (1)$$

Luftkondensatoren werden normalerweise im Kreuzstrom betrieben. Die Temperatur des kondensierenden Dampfes ist aber örtlich über den gesamten Kondensator konstant. Der Verlauf der Temperaturen der durchfließenden Medien zwischen dem jeweiligen Ein- und Austritt des Kondensators für das entsprechende Medium ist exemplarisch in Abbildung 1 zu sehen.

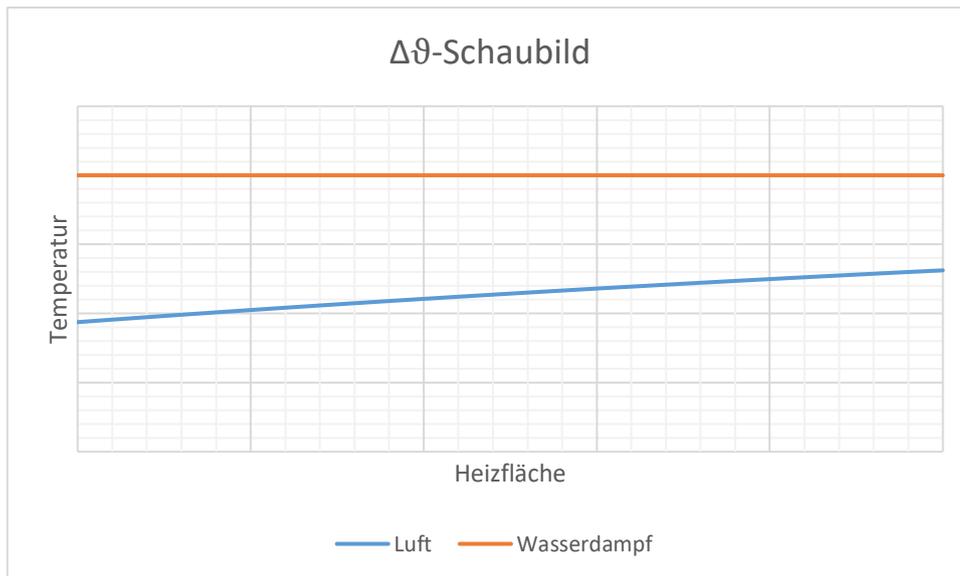


Abbildung 1: Temperaturverlauf im Kondensator

Aufgrund der konstanten Temperatur des Kondensats, lässt sich trotz des Betriebes in Kreuzstrom zur Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_M$ der logarithmische Mittelwert verwenden:

$$\Delta\vartheta_M = \frac{(\vartheta_K - \vartheta_U) - (\vartheta_K - \vartheta_{Abluft})}{\ln\left(\frac{\vartheta_K - \vartheta_U}{\vartheta_K - \vartheta_{Abluft}}\right)} = \frac{\vartheta_{Abluft} - \vartheta_U}{\ln\left(\frac{\vartheta_K - \vartheta_U}{\vartheta_K - \vartheta_{Abluft}}\right)} \quad (2)$$

2.1 Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten

Rechnerisch zeigt sich der Einfluss der Verschmutzung auf den Wärmedurchgangskoeffizienten k durch einen zusätzlichen Foulingwiderstand R_f .

$$\frac{1}{k_{Schmutzig}} = \frac{1}{k_{Sauber}} + R_f \quad (3)$$

Der luftseitige Foulingwiderstand bei Luftkondensatoren hängt stark von den Bedingungen am Standort ab. Eine genaue Ermittlung dieses Wertes bei der Auslegung ist normalerweise nicht möglich. Es existieren Tabellenwerte der TEMA [3], die aber nur als grobe Richtwerte gedacht sind. Entsprechend ungenau ist auch die Berechnung der zusätzlich erforderlichen Übertragungsfläche.

Den Tabellenwerten der TEMA kann man den Foulingwiderstand für Druckluft von $R_f = 0,35 \frac{m^2 \cdot K}{kW}$ entnehmen.

Der Wärmedurchgangskoeffizient bezogen auf die Oberfläche A der berippten Seite lässt sich berechnen durch:

$$k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta\vartheta_M} \quad (4)$$

Für den untersuchten Kondensator beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient im sauberen Zustand ca. $k_{sauber} = 40 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Durch den zusätzlichen Foulingwiderstand R_f verringert er sich auf $k_{Schmutzig} = 39,45 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der der Tabelle entnommene Foulingwiderstand R_f sich nicht explizit auf berippte Oberflächen bezieht. Für den Foulingfaktor bei mit Luft betriebenen Wärmeübertragungsapparaten mangelt es an Tabellenwerten. Messwerte legen allerdings nahe, dass sich der Wärmedurchgangskoeffizient in der Realität deutlich stärker verringert (über 10%), was auf einen deutlich höheren Foulingwiderstand schließen lässt.

2.2 Einfluss auf den Luftmassenstrom

Durch die Verengung der Luftkanäle erhöht sich der Druckverlust der Luft über die Lamellen. Bei gleicher Leistung der Ventilatoren verringert sich damit der Luftmassenstrom. Die Temperatur der Abluft nach Verlassen des Kondensators beträgt:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (\vartheta_{Abluft} - \vartheta_U) \Rightarrow \vartheta_{Abluft} = \vartheta_U + \frac{\dot{Q}}{c_{p,Luft} \cdot \dot{m}_{Luft}} \quad (5)$$

Wenn sich der Massenstrom der Luft verringert, muss die Temperatur der Abluft steigen, damit die erforderliche Wärmemenge abtransportiert werden kann. Mit steigender Temperatur der Abluft würde die mittlere Temperaturdifferenz über den Kondensator sinken. Aus Gleichung (1) geht hervor, dass damit der übertragbare Wärmestrom reduziert wird. Der Kondensator ist so gebaut, dass er den zugeführten Dampf auf jeden Fall auskondensiert. Die abzugebende Wärmemenge wird folglich durch die Dampffzufuhr vorgegeben. Um die erforderliche Wärme abzuführen, steigt die Temperatur im Kondensator. Dadurch steigt wieder die mittlere Temperaturdifferenz.

2.3 Bedeutung für den Kraftwerksprozess

In dem Kondensator wird der unter Vakuum aus der Turbine strömende Dampf kondensiert. Das bereits in der Turbine entstandene Kondensat wird durch eine Entwässerungspumpe vom Dampf getrennt, sodass annähernd reiner Sattdampf ($x=1$) in den Kondensator strömt. Das entstehende Kondensat und der Dampf innerhalb der Lamellenrohre sind in ständigem Kontakt. Dadurch findet die Kondensation nahezu ohne Unterkühlung des dabei entstehenden Kondensats statt. Das Wasser verlässt den Kondensator auskondensiert ($x=0$) mit der

Temperatur ϑ_K . Der bei der Kondensation an die Umgebung abgegebene Wärmestrom lässt sich berechnen durch:

$$\dot{Q} = \dot{m}_D \cdot r \quad (6)$$

Mit der Verdampfungsenthalpie r des Wassers bei der in dem Kondensator auftretenden Temperatur und dem Dampfmassenstrom \dot{m}_D .

Durch die Verschmutzungen steigt die Temperatur im Inneren des Kondensators. Der in dem Kondensator herrschende Druck entspricht dem Kondensationsdruck des Dampfes bei der bestehenden Temperatur. Mit zunehmender Temperatur steigt der Kondensationsdruck, sodass auch der Druck im Kondensator ansteigt. Dieser ist maßgebend für den Druck am Austritt der Turbine. Somit steigt mit zunehmender Kondensator-Temperatur auch der Austrittsdruck der Turbine. Das führt dazu, dass die Turbine weniger Strom erzeugen kann.

Zusätzlich kann ein zu hoher Druck am Turbinen-Austritt zu einer Beschädigung der Turbinenschaufeln führen. Die Temperatur im Kondensator darf deshalb einen bestimmten Wert nicht überschreiten. Das bedeutet, dass die mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_M$ begrenzt ist. Da die Verdampfungsenthalpie r und auch die Fläche A konstant sind, kann ein Absinken des Wärmedurchgangskoeffizienten k und ein Ansteigen der Ablufttemperatur ϑ_{Abluft} nur noch durch Reduktion des Dampfmassenstromes kompensiert werden.

$$\dot{m}_D \cdot r = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_M \quad (7)$$

Um zu verhindern, dass die Temperatur zu hoch wird, muss der Dampfmassenstrom reduziert werden. Dadurch, dass weniger Dampf in der Turbine expandiert, verringert sich die Stromproduktion zusätzlich. Außerdem bedeutet das eine Reduktion der Verbrennungsmasse. Bei einer Müllverbrennungsanlage führt auch das zu Verlusten.

2.4 Definition des Gütefaktors

Die beiden Einflüsse sind nun noch gesondert aufgeführt. Um sie in einem Wert zusammenzufassen, wird die Veränderung des Luftmassenstroms durch seine Abweichung vom idealen Luftmassenstrom bei sauberen Lamellen beschrieben:

$$\dot{m}_{Luft} = f_{Luft} \cdot \dot{m}_{Luft,ideal} \quad (8)$$

Der Faktor f_{Luft} beschreibt dabei die Abweichung des Luftmassenstroms vom Luftmassenstrom im idealen Zustand. Verringert sich der Luftmassenstrom beispielsweise um 30%, würde $f_{Luft} = 0,7$ betragen. Damit lässt sich die Gleichung zur Berechnung der Abluft-Temperatur auch darstellen durch:

$$\vartheta_{Abluft} = \vartheta_U + \frac{\dot{Q}}{f_{Luft} \cdot \dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}} \quad (9)$$

Eingesetzt in die Gleichung (2) der logarithmischen mittleren Temperaturdifferenz, führt das zu:

$$\Rightarrow \Delta\vartheta_{M,real} = \frac{\frac{\dot{Q}}{f_{Luft} \cdot \dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}}{\ln\left(\frac{\vartheta_K - \vartheta_U}{\vartheta_K - \vartheta_U - \frac{\dot{Q}}{f_{Luft} \cdot \dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}}\right)} \quad (10)$$

Auch die mittlere Temperaturdifferenz kann sich durch die mittlere Temperaturdifferenz im idealen Zustand und der Abweichung darstellen lassen:

$$\Delta\vartheta_{M,real} = F \cdot \Delta\vartheta_{M,ideal} \quad (11)$$

Mit der mittleren Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{M,ideal}$, die sich einstellen würde, wenn der Luftmassenstrom dem Idealwert $\dot{m}_{Luft,ideal}$ entspräche. F ist ein Faktor, der definiert wurde um die Abweichung der realen mittleren Temperaturdifferenz von der bei idealem Luftmassenstrom darzustellen. Ein Auflösen der Gleichung (11) nach F ergibt:

$$F = \frac{\ln\left(1 - f \cdot \left(1 - e^{\frac{k \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}}\right)\right)}{\frac{k \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \quad (12)$$

Damit lässt sich die Grundgleichung für Wärmeübertragungsapparate (Gleichung (1)) auch darstellen durch

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot F \cdot \Delta\vartheta_{M,ideal} \quad (13)$$

Zum Schluss werden die von der Verschmutzung beeinflussten Werte zu einem Faktor zusammengefasst:

$$F_G = k \cdot A \cdot F \quad (14)$$

Der Gütefaktor wird definiert durch die Abweichung dieses Faktors F_G von dem Wert den er im sauberen Zustand annimmt:

$$G = \frac{F_G}{F_{G,ideal}} \quad (15)$$

Das führt zu der Gleichung des Gütefaktors:

$$G = \frac{\ln \left(1 - f \cdot \left(1 - e^{\frac{-k \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \right) \right)}{\frac{k_{ideal} \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \quad (16)$$

2.5 Einordnung des Gütefaktors

Der Gütefaktor ähnelt der Betriebscharakteristik [6] [7] [8]. Beide sind dimensionslose Werte zwischen Null und Eins, die die Leistungsfähigkeit des Kondensators bewerten.

Die Betriebscharakteristik lässt sich berechnen durch:

$$\theta = \frac{1 - e^{\frac{-k \cdot A}{\dot{c}_{Luft}}} \cdot \left(1 + \frac{\dot{c}_{Luft}}{\dot{c}_D} \right)}{1 + \frac{\dot{c}_{Luft}}{\dot{c}_D}} \quad (17)$$

Da ein Kondensator betrachtet wird, ist der Wärmekapazitätsstrom des Dampfes \dot{c}_D als unendlich anzusehen, deshalb gilt $\frac{\dot{c}_{Luft}}{\dot{c}_D} = 0$. Das vereinfacht die Gleichung zu:

$$\theta = 1 - e^{\frac{-k \cdot A}{\dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft}}} \quad (18)$$

Die Betriebscharakteristik vergleicht den auftretenden Wärmestrom mit dem physikalisch höchstmöglichen Wärmestrom bei den vorliegenden Massenströmen der Medien. Eine Veränderung des Luftmassenstroms führt dazu, dass der von der Betriebscharakteristik als Idealzustand betrachtete Wert sich ändert. Während eine Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten die Betriebscharakteristik verringert, führt ein Absinken des Luftmassenstroms dazu, dass sich die Betriebscharakteristik erhöht. [7]

In der Praxis führt jedoch bei beiden Werten ein Absinken zu einer Verminderung der Leistungsfähigkeit des Kondensators. Bei der Betriebscharakteristik heben sich zwei eigentlich gleichgerichtete Effekte teilweise gegenseitig auf.

Zum Vergleich die Gleichung des Gütefaktors:

$$G = \frac{\ln \left(1 - f \cdot \left(1 - e^{\frac{-k \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \right) \right)}{\frac{k_{ideal} \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \quad (19)$$

Mit $f \cdot \dot{m}_{Luft,ideal} = \dot{m}_{Luft}$

$$\Rightarrow G = \frac{\ln(1 - f \cdot \theta)}{\frac{k_{ideal} \cdot A}{\dot{m}_{Luft,ideal} \cdot c_{p,Luft}}} \quad (20)$$

Der Gütefaktor lässt sich betrachten wie die Betriebscharakteristik, erweitert um einen zusätzlichen Term, der sie auf einen Zustand mit festem Luftmassenstrom und einem festen Wärmedurchgangskoeffizienten normiert. Durch eine entsprechende Festlegung der Bezugswerte, lässt sich ein fester Betriebspunkt für den Vergleich einstellen, z.B. bei sauberen Übertragungsflächen.

2.6 Die automatisierte Reinigungsanlage

Die beste Möglichkeit, die Verschmutzungen in den Griff zu bekommen, ist der Betrieb einer automatisierten Reinigungsanlage. Ein Beispiel einer solchen Anlage an einem Luftkondensator ist in Abbildung 2 zu sehen. Die Düsen fahren die Oberfläche des Kondensators vollautomatisch ab und befreien so die Lamellen oder Rippenrohre von Ablagerungen. Sie arbeiten mit geringen Mengen Wasser ohne Zusätze (ca. 4 Liter in der Minute) und Druckluft (ca. 8 bar). So lassen sich ca. 100 Quadratmeter in der Stunde reinigen. Durch die schonende Reinigung kommt es zu keiner Beschädigung der empfindlichen Lamellen. Auch verzinkte Oberflächen werden nicht angegriffen.



Abbildung 2: Beispiel für eine automatisierte Reinigungsanlage JetMasterAS der Firma mycon GmbH

3 Verlust durch Verschmutzung in der Praxis

Der Gütefaktor bewertet, welche Temperatur sich im Luftkondensator einstellt, um bei einer bestimmten Umgebungstemperatur einen bestimmten Wärmestrom zu erzielen. Umgekehrt lässt sich aus einem angenommenen Gütefaktor berechnen, welche Temperatur sich im Kondensator einstellen muss um den gewünschten Wärmestrom zu übertragen. Wird dabei ausgegangen von dem idealen Gütefaktor $G = 1$, lässt sich berechnen welche Temperatur im Kondensator herrschen würde, wenn die Wärmetauscherflächen sauber wären. Außerdem lässt sich berechnen, wie weit der Dampfmassenstrom reduziert werden müsste, damit die Höchsttemperatur nicht überschritten wird. Daraus lässt sich auf das Verhalten der weiteren relevanten Prozessgrößen im Wasser-Dampf-Kreislauf schließen, was letzten Endes zur Berechnung der Stromproduktion und der Brennstoffzufuhr führt. Die Differenz aus der errechneten Produktion bei sauberen Flächen und der real auftretenden Produktion stellt den Verlust durch die Verschmutzung dar. Dies dient als Grundlage für den Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Reinigungszeitpunkte

Der Wasser-Dampf-Kreislauf der betrachteten Müllverbrennungsanlage ist vereinfacht dargestellt in Abbildung 3 zu sehen.

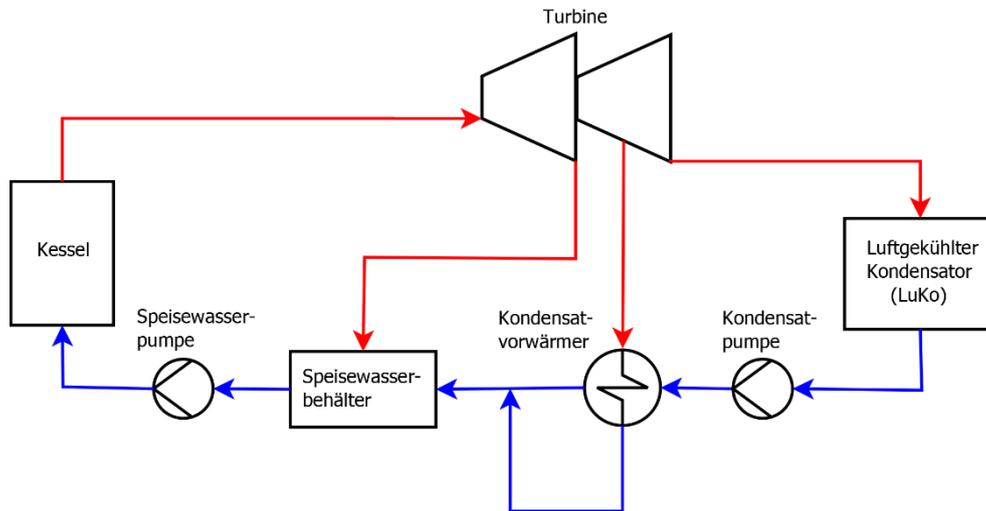


Abbildung 3: Wasser-Dampf-Kreislauf

Das Wasser wird im Kessel verdampft und überhitzt. Anschließend strömt der Dampf durch die Turbine, wo er expandiert. Ein Teil des Dampfes wird entnommen, um das Kondensat im Speisewasserbehälter zu entgasen. Ein anderer Teil gelangt über eine Anzapfung in den Kondensat-Vorwärmer, wo er Wärme an das Kondensat abgibt und anschließend mit ihm vermischt wird. Der Rest des Dampfes strömt dann in den luftgekühlten Kondensator (kurz LuKo), wo er auskondensiert, bevor er von der Kondensat-Pumpe in den Kondensat-Vorwärmer befördert wird. Dort wird das Kondensat vorgewärmt und gelangt anschließend in den Speisewasserbehälter, wo es mit dem Entnahme-Dampf zum Sieden gebracht wird, um die darin enthaltenen Gase zu lösen. Dann befördert die Speisewasserpumpe das Kondensat wieder in den Kessel, womit sich der Kreis schließt.

Im Rahmen des Projekts wurden Daten einer realen Müllverbrennungsanlage ausgewertet. Dabei wurde zunächst ein Jahr in normalem Betrieb beobachtet. Es fanden in diesem Jahr, entsprechend der Herstellerangaben, zwei Reinigungen statt. Anschließend wurde eine automatische Reinigungsanlage installiert, die den Kondensator alle zwei Wochen automatisch gereinigt hat. Der Gütefaktor wurde dabei jeweils aus dem übertragenen Wärmestrom, der aus einer Bilanzierung des Gesamtsystems hervorging und der gemessenen Umgebungs- und Kondensat-Temperatur berechnet. Dadurch ließ sich zeigen, dass der Gütefaktor sich sehr gut eignet, den Verlauf der Verschmutzung zu erfassen und die auf ihm basierende Prognose des Betriebszustandes bei sauberem Kondensator funktioniert. Die Daten des Kraftwerks möchten wir nicht veröffentlichen, weshalb die Ergebnisse an Diagrammen eines simulierten Kraftwerks gezeigt werden.

Die Auswertung der Messdaten des untersuchten Kraftwerks liefert den folgenden Verlauf des Gütefaktors (Abbildung 4):

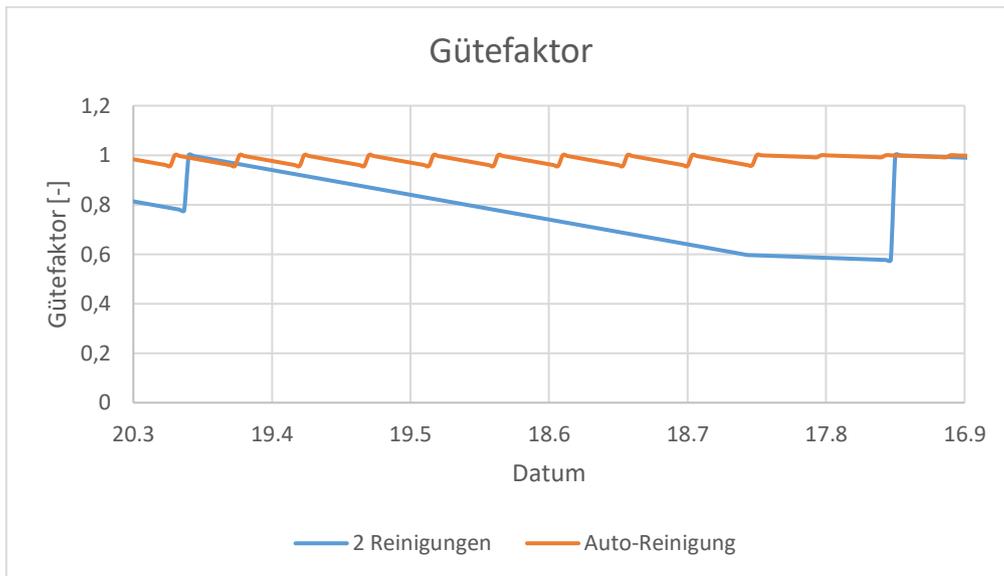


Abbildung 4: Vergleich Gütefaktor

Hier werden die Verläufe des Gütefaktors für zwei verschiedene Jahre verglichen. In blau ist das Jahr ohne die automatisierte Reinigung dargestellt. Es wurden zwei Reinigungen durchgeführt, eine Anfang April und die andere Ende August. Es ist erkennbar, dass der Gütefaktor zu den Terminen der Reinigungen auf den idealen Wert von $G = 1$ springt. Der Verlauf zeigt, dass sich der Gütefaktor innerhalb von nur fünf Monaten um 40% verringert, effektiv stehen dann nur noch 60% des Kondensators zur Verfügung. Durch eine regelmäßige, automatisierte Reinigung ist es möglich, den Kondensator annähernd im Idealzustand zu halten. Was auch auffällt, ist, dass der Gütefaktor ab Ende Juli langsamer fällt. Das liegt daran, dass zu der Zeit der Pollenflug endet. Am untersuchten Standort sind Pollen die Hauptursache für Verschmutzungen, da in der Nähe viele Bäume stehen.

Der Einfluss auf die Stromproduktion ist im Diagramm in Abbildung 5 dargestellt.

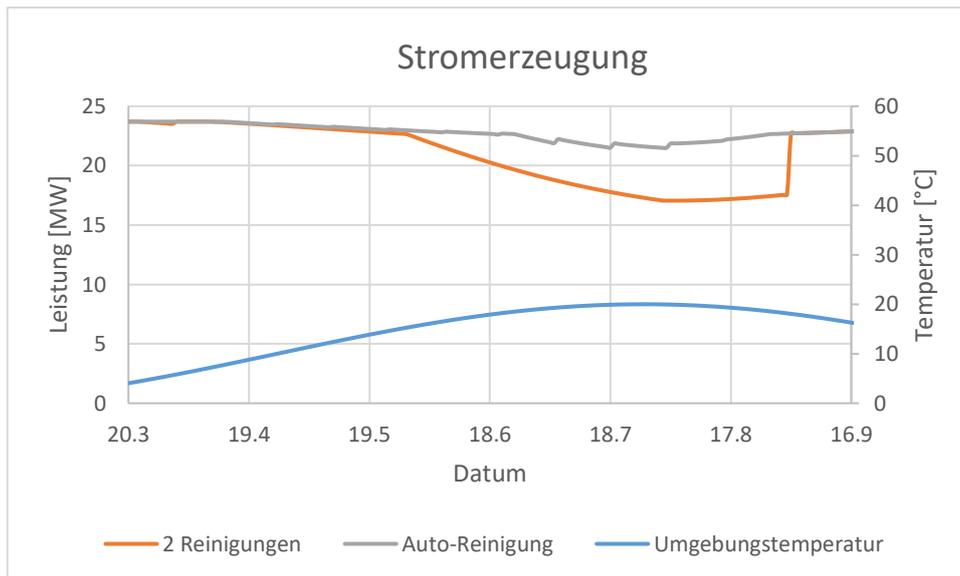


Abbildung 5: Vergleich Stromerzeugung

In diesem Diagramm wird die Stromerzeugung mit und ohne automatische Reinigung verglichen. Zusätzlich ist der Verlauf der Umgebungstemperatur als Tagesmittelwert dargestellt auf der Sekundärachse aufgetragen. Aufgrund der Verschmutzung bricht die Stromproduktion um bis zu 20% ein. Durch die automatische Reinigung alle zwei Wochen konnte ein Großteil des Einbruches vermieden werden. Da die Umgebungstemperaturen ab August abfallen, ist trotz Zunahme der Verschmutzung ein Anstieg der Stromerzeugung vorhanden.

Sehr ähnlich sieht der Verlauf bei dem Mülldurchsatz aus (Abbildung 6). Auch hier ist ein deutlicher Einbruch erkennbar, der durch die Verschmutzungen verursacht wird.

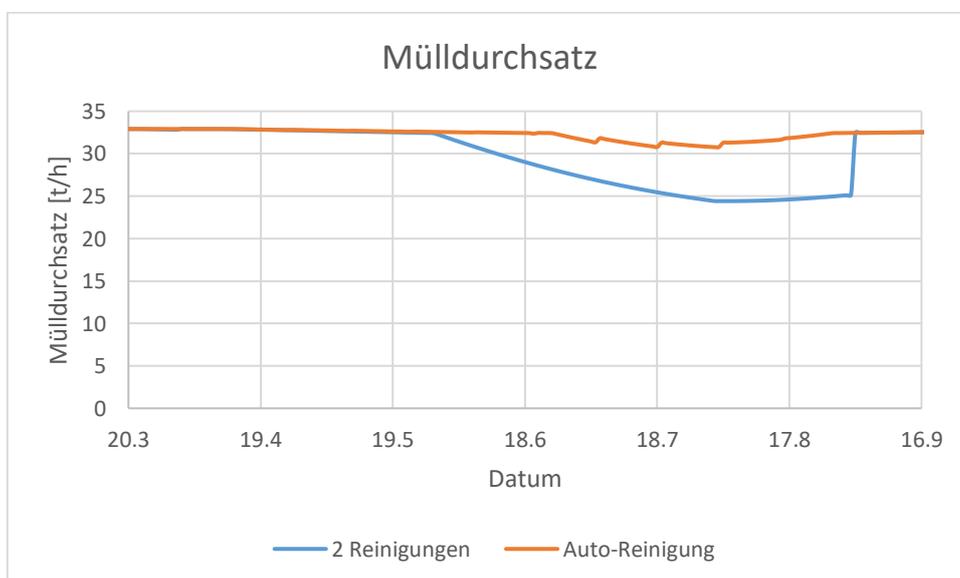


Abbildung 6: Vergleich Mülldurchsatz

4 Fazit

Aufgrund von verschmutzten Wärmeübertragungsflächen kann es zu erheblichen Einbrüchen in der Produktion kommen, selbst wenn der Wärmeübertragungsapparat zweimal im Jahr gereinigt wird. In der untersuchten Anlage entsprachen die verschmutzungsbedingten Verluste ca. 3% der Jahresproduktion. Diese Verluste konnten durch die Installation und den Betrieb einer automatischen Reinigungsanlage fast vollständig verhindert werden.

Mit dem Gütefaktor wurde ein Kennwert definiert, der sich eignet, um die luftseitige Verschmutzung von mit Luft arbeitenden Wärmeübertragungsapparaten zu beurteilen, da er die Einflüsse der Verschmutzung auf den Luftmassenstrom mitberücksichtigt. Über ihn lässt sich auch der Einfluss der Verschmutzungen auf das System, in dem der Wärmeübertragungsapparat integriert ist, berechnen.

Über den Gütefaktor kann der ControlMaster zu jedem Zeitpunkt ermitteln, welche Verluste durch die Verschmutzungen des Kondensators entstehen. Unter Berücksichtigung der Kosten einer Reinigung, bestimmt er den optimalen Zeitpunkt ihrer Durchführung. Dies ist sowohl für manuelle wie auch für automatische Reinigungen möglich. Auch die Kosten, die durch das Abschalten der Ventilatoren für die Reinigung entstehen, lassen sich berücksichtigen. In Kombination mit einer automatischen Reinigungsanlage, kann der ControlMaster die Reinigungen auch selbstständig starten. Außerdem kann er die durch Durchführung der Maßnahme erzielten Einsparungen erfassen, indem er ermittelt wie der Gütefaktor sich ohne die Reinigungen verhalten hätte und davon ausgehend berechnen, welche Stromproduktion und welcher Mülldurchsatz sich eingestellt hätten.

Die Digitalisierung der Verschmutzung ermöglicht das gezielte Durchführen von Maßnahmen und das Betreiben im energetischen Optimum.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) für die Förderung der Forschungsarbeiten mit Finanzmitteln im Rahmen des Förderprojekts Einsparzähler.

Außerdem danken wir der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW-Hamburg) für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung im Rahmen des Projekts.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Müller-Steinhagen, H.: Heat Exchanger Fouling – Mitigation and Cleaning Technologies. Essen: PUBLICO Publications, 2000., S.25
- [2] Nienborg, B.; Santhanam, S.; Schnabel, L.; Mathieu, M.; Schwärzler, A.; Conzelmann, K.: Detektion von Fouling – Leistungsüberwachung an Verdunstungskühlanlagen mit geschlossenem Kreislauf. In: KKA Ausgabe Großkälte/2019 (2019) URL: https://www.kka-online.info/artikel/kka_Detektion_von_Fouling_3360626.html (Stand 21.06.19)
- [3] Müller-Steinhagen, H.: Verminderung der Ablagerungsbildung in Wärmeübertragern. In: Gesellschaft, VDI: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2013., S. 91-121.
- [4] Schmidt, K. G.: Wärmeübergang an berippten Rohren. In: Gesellschaft, VDI: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2013., S. 1459-1463.
- [5] Numrich, R.; Müller, J.: Filmkondensation reiner Dämpfe. In: Gesellschaft, VDI: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2013., S. 1011-1028.
- [6] Bosnjakovic, F; Knoche, K. F.: Technische Thermodynamik - Teil II. 6. Auflage. Darmstadt: Steinkopff Darmstadt, 1997
- [7] VDI 4663 (2019), Bewertung von Energie- und Stoffeffizienz – Methodische Anwendung des Physikalischen Optimums, VDI-Richtlinie, 04/2019
- [8] Marek, R.; Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen – Anwendungen – Übungsaufgaben. München: Karl Hanser Verlag, 2015