



Grundlagenprojekt im Rahmen der energetischen und ökologischen
Modernisierung der Evangelischen Stiftung Neuerkerode:
Bestandsaufnahme des Gebäude- und Anlagenbestandes

Abschlussbericht 05: Dampferzeugung, Netz und Verbraucher

Der Bericht wurde erstellt von /
Das Projekt wurde bearbeitet von:

Die Verantwortung für den Inhalt
des Berichtes liegt bei den Verfassern.

Dipl.-Ing. (FH) Elmar Stolte, Wolfenbüttel
Dipl.-Ing. (FH) Alex Hübener, Athenstedt
Dr.-Ing. Kati Jagnow, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Dieter Wolff, Wolfenbüttel

Inhalt

1	Vorwort und Einleitung	4
1.1	Aufgaben des Teilprojektes	4
1.2	Mitarbeiter und Bearbeiter	4
1.3	Überblick der Ergebnisse.....	5
2	Bestandsaufnahme Technik	7
2.1	Überblick	7
2.1.1	Gesetzliche Einordnung der Anlage.....	7
2.1.2	Skizze mit wichtigen Komponenten.....	8
2.1.3	Betrieb der Anlage	9
2.2	Dampferzeugung	10
2.2.1	Kessel und Brenner	10
2.2.2	Brennersteuerung	12
2.2.3	Speisewasseraufbereitung und Entgasung	13
2.2.4	Kondensatbehälter und Kondensatpumpen im Kesselhaus	17
2.3	Netz	18
2.4	Aufnahme der Dampfabnehmer	21
2.4.1	Küche	21
2.4.2	Wäscherei.....	22
2.4.3	Überblick.....	24
3	Dampfmessung	25
3.1	Durchführung der Messung	25
3.2	Messwertverläufe.....	27
4	Energetische Bewertung	30
4.1	Erzeuger	30
4.1.1	Zugeführte Energiemenge	30
4.1.2	Abgasverlust.....	30
4.1.3	Strahlungs- und Bereitschaftsverlust.....	31
4.1.4	Verlust durch thermische Entgasung	32
4.2	Netz	34
4.2.1	Wärmeverluste am Rohrnetz	34
4.2.2	Erdleitungen	35
4.2.3	Gebäudeleitungen	37
4.2.4	Wärme- und Medienverluste an Kondensatbehältern	40
4.2.5	Jahres-Verlustwärmemenge der Verteilung	41
4.3	Gesamtbilanz und Nutzungsgrad	43
4.4	Überprüfung der Rechenwerte anhand der Dampfmessung	43
5	Dampfkosten	45
5.1	Brennstoffkosten	45
5.2	Hilfsenergiekosten	45
5.3	Hilfsstoffkosten	46
5.4	Wartungs- und Reparaturkosten	47
5.5	Lohnkosten	48
5.6	Zusammenfassung aller Kostenstellen	48

6	Verbesserungsmöglichkeiten	50
6.1	Rohrnetz.....	50
6.1.1	"Sowieso"-Maßnahme; Sanierung der Erdleitung im Bereich der Küche.....	50
6.1.2	Übriges Rohrnetz und Behälter.....	51
6.2	Kesselaufrüstung oder -tausch	52
6.3	Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit gering investiver Maßnahmen.....	54
6.4	Hilfsenergieaufwendungen	55
6.5	Umstellung auf 72 Stunden-Betrieb ohne Beaufsichtigung	55
6.6	Verbrauchs- und Betriebsumstellung	55
7	Ausblick und Anhang.....	57
7.1	Ausblick auf die anderen Teilberichte.....	57
7.2	Überblick über die Anlagen zu diesem Teilbericht.....	57

1 Vorwort und Einleitung

1.1 Aufgaben des Teilprojektes

Im Rahmen des Grundlagen-Projektes der DBU ist eine Bestandsaufnahme der Anlagentechnik des Dampfnetzes in der Evangelischen Stiftung Neuerkerode anzufertigen. Ausgehend von der Wärmeerzeugung über die Verteilung bis hin zur Übergabe des Dampfes an die Verbraucher sollen dabei Anlagenparameter wie: der Jahresnutzungsgrad, die Verteilverluste, die Kosten für die Dampferzeugung u. ä. herausgearbeitet werden.

Das Dampfnetz ist 1973 in Betrieb gegangen. Die Dampferzeugung selbst sowie einige Abschnitte des Verteilnetzes sind noch heute unverändert. Das Netz versorgt die Verbraucher der Küche (Küchentechnik, Luftheizregister) und der Wäscherei.

Die energetische Bewertung der Dampfversorgung basiert zum einen auf Dampfmessungen in der Kesselzentrale, zum anderen auf den festzustellenden technischen Eigenschaften der Komponenten. Es werden vor Ort u. a. erfasst: Leitungslängen und deren Dämmstandards, Kesselleistungen und Behältergröße, Oberflächenverluste und Abgasverluste, Hilfsenergieverbraucher, Medienverluste.

Basierend darauf sollen Ansätze für Einsparmaßnahmen erarbeitet und vorgestellt werden. Es soll aus der erreichbaren Einsparung abgeschätzt werden, wie umfangreich Sanierungsmaßnahmen ausgeführt werden können.

Die Arbeit ist in fünf Abschnitte gegliedert. Die Bestandsaufnahme gibt einen Überblick über den Betrieb. Die Erzeuger, das Netz und die Abnehmer werden beschrieben. Anschließend werden die durchgeführte Dampfmessung erläutert und die Messergebnisse ausgewertet.

Der dritte Abschnitt umfasst die energetische Bewertung der Zentrale und des Netzes. Alle Verlustposten werden ausgewertet und ein Gesamtenergieflussbild erstellt. Aus dieser Bilanz ergeben sich die Dampfkosten bzw. der Dampfpreis. Hierin sind jedoch nicht nur energetische Kostenanteile enthalten, sondern auch Investitionskosten, Hilfsstoffkosten, Wartungskosten und Lohnkosten der Kesselwärter.

Der letzte Abschnitt fasst mögliche Verbesserungsansätze zusammen und bewertet deren Einsparerfolg. Daraus kann im Einzelfall bereits eine grobe Wirtschaftlichkeit abgeleitet werden.

1.2 Mitarbeiter und Bearbeiter

Dieses Teilprojekt wurden bearbeitet von:

- Elmar Wetter-Stolte im Rahmen seiner Diplomarbeit
- Alexander Hübener zur Unterstützung der Datenauswertung, Thermographie
- Kati Jagnow zur Unterstützung der Dampfmessung

Für alle Projekte wurde auf die Hilfe von Mitarbeitern der Stiftung Neuerkerode zurückgegriffen, insbesondere sei gedankt den Herren Hennebichler und Everling.

1.3 Überblick der Ergebnisse

In der Diplomarbeit von Elmar Wetter-Stolte wurde die Dampfversorgung der Stiftung Neuerkerode aufgenommen und energetisch bewertet. Die Aufnahme liefert folgende wichtige Erkenntnisse:

- die Dampfkessel sind Baujahr 1973, erzeugen Satttdampf (max. 3,2 t/h) mit maximal 13 bar Absolutdruck
- es sind zwei Zweistoffbrenner (Gas, Heizöl) vorhanden, Baujahr 1987 mit 1,14 und 0,86 MW Leistung
- die Erzeuger sind immer in Betrieb, das Netz zur Versorgung der Wäscherei und der Küche wird nachts abgeschiebert
- das Netz verfügt weiterhin über drei Kondensatbehälter (Zentrale, Wäscherei, Küche) mit Kondensatpumpen; die Behälter sind teils schlecht gedämmt
- es gibt eine Speisewasseraufbereitung und Entgasung (3900 l-Behälter) mit Umkehr-Osmose-Anlage für das nachzuspeisende Frischwasser

Die Verteilung verläuft teils im Erdreich, teils in Kellerräumen. Die Gesamtleitungslänge von Dampf- und Kondensatleitungen beträgt 750 m. Nach Informationen durch Mitarbeiter der Stiftung ist die größte Schwachstelle des Netzes die Außenkorrosion an den Erdleitungen, die vermutlich auf Schäden in der Außenhaut der Wärmedämmung zurückzuführen ist. Die Kellerleitungen sind teilweise nicht oder schlecht gedämmt.

Die Dampfahnehmer sind die Geräte der Küche und Wäscherei, wobei über ein Jahr gesehen die Wäscherei etwa 90 % der Dampfmenge abnimmt.

Die Bewertung der Komplettanlage führt zu einem Energiebilanzflussbild. Dieses wurde anhand einer Dampfmesung sowie anhand der Verbraucherliste überprüft. Es ist plausibel, die Rechenwerte bestätigen sich auf etwa 10 % genau.

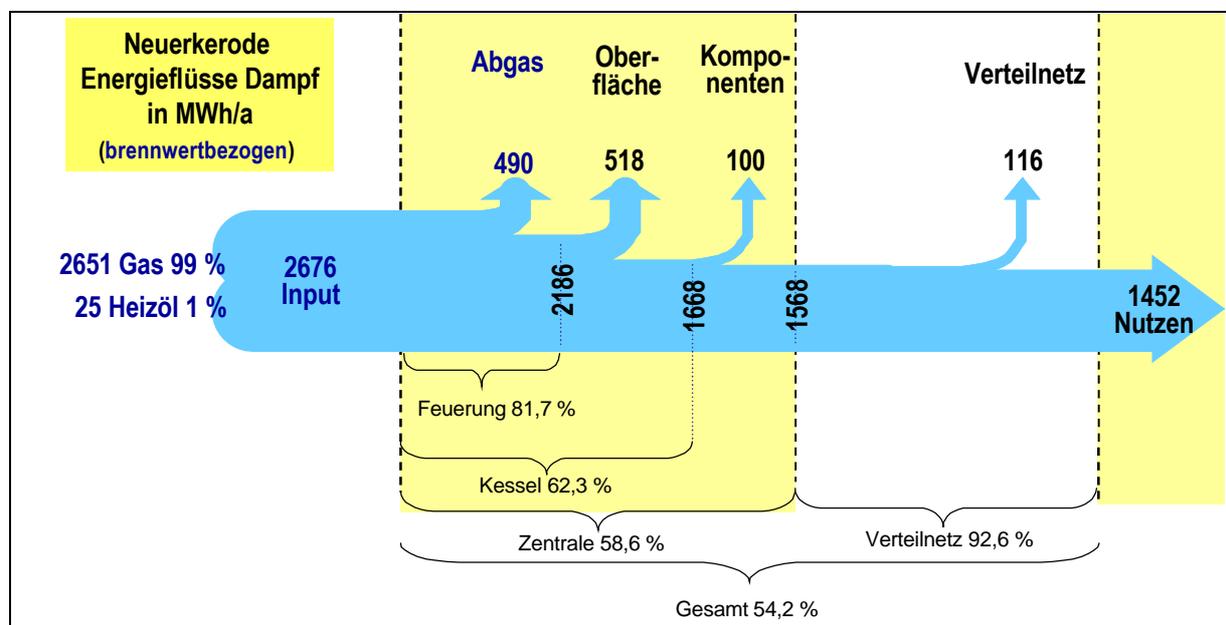


Bild 1 Gesamtbilanz Dampf

Anhand des Bilanzflussbildes kann ein Dampfpreis als Vollkostenpreis incl. Energiekosten, Hilfsstoffkosten, Wartungs- und Reparaturkosten sowie der Gehälter für die Kesselwärter bestimmt werden.

Dieser Preis liegt bei 0,156 €/kWh. Die Kostenanteile zeigt nachfolgende Grafik.

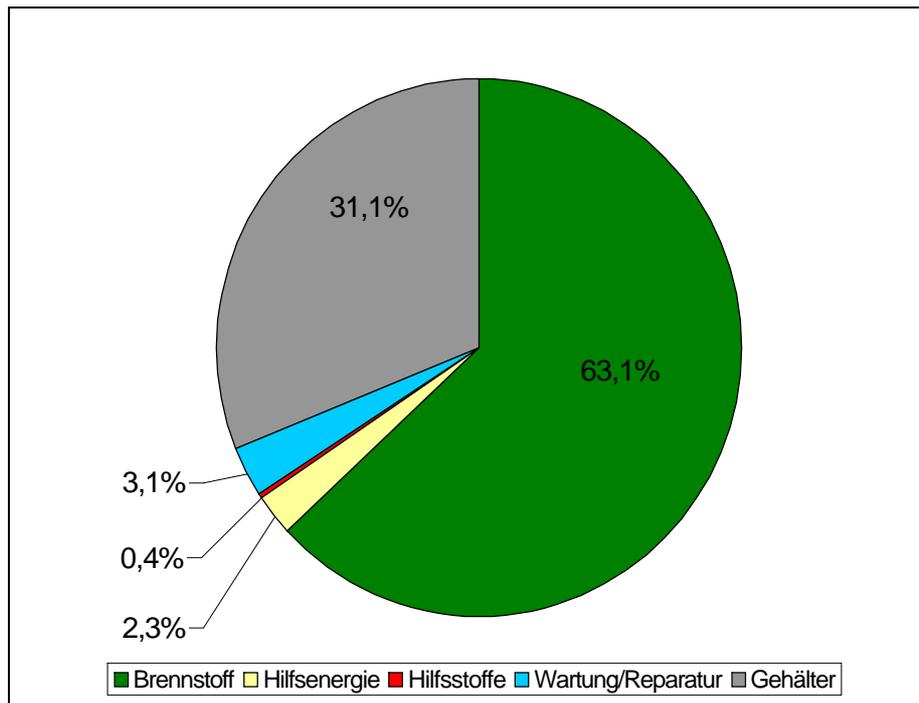


Bild 2 Kostenanteile des Dampfpreises

Für die Dampfversorgung sind etliche Verbesserungsmaßnahmen denkbar, von denen einige gering investiv sind:

- Leitungsdämmung, wo zugänglich
- Nachdämmung aller Behälter und der Kessel
- Nachrüstung eines Abgaswärmetauschers und damit Vorwärmung des Speisewassers

Die Gesamtbilanz dieser Maßnahmen lässt eine Dampfersparnis von 466 MWh/a vermuten. Das sind 17 % der heutigen Gesamtenergiemenge. Die Einsparung rechtfertigt Investitionen im Bereich von 318.000 € (heutige Energiepreise als Maßstab) bis 715.000 € (mittlere künftige Energiepreise als Maßstab).

Da das Dampfnetz etwa ein Viertel der Gesamtenergiekosten der Stiftung ausmacht, sollten diese Maßnahmen unbedingt umgesetzt werden. Langfristig ist ein neuer Dampfkessel vorzusehen oder die Dampferzeugung komplett zu ersetzen.

2 Bestandsaufnahme Technik

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Dampfversorgung der Stiftung Neuerkerode und ihren Einzelkomponenten. Es werden das Verteilnetz und die Erzeuger, die Steuerung und letztlich die Abnehmer näher vorgestellt.

2.1 Überblick

Zur Versorgung der eigenen Wäscherei und der Küche verfügt die Stiftung Neuerkerode über ein Dampfnetz aus dem Jahr 1973, welches im Jahr 2001 nach Angaben des Betreibers im Bereich der Erdleitungen vollständig saniert worden ist.

Die Dampferzeugung in Neuerkerode besteht aus zwei parallel geschalteten Großraumwasserkesseln der Gruppe IV. Die Befuerung der Kessel erfolgt zu 99 Prozent mit Erdgas L und zu einem Prozent mit Heizöl EL. Die Umschaltung von Gas auf Öl erfolgt bei zu hohen Gasverbrauchsspitzen direkt vom Energieversorger ("Abschaltkunde").

Erzeugt werden maximal 3,2 t/h Sattdampf von maximal 13 bar (abs.).



Bild 3 Kesselhaus (Südansicht) mit den beiden Dampfkesselkaminen links

2.1.1 Gesetzliche Einordnung der Anlage

Es handelt sich laut BImSchG (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge) um eine genehmigungsbedürftige Anlage. Der Betreiber muss daher nach § 26 BImSchG wiederkehrende Emissionsmessungen (gemäß § 28 BImSchG) durchführen lassen sowie nach § 27 BImSchG nach Ablauf eines festgelegten Zeitraumes eine Emissionserklärung bei der zuständigen Stelle einreichen (Angabe über Art, Menge sowie Zeitverteilung der Emissionen; s. Anhang II (Teil 4)).

Genehmigungsbedürftige Anlagen sind nach BImSchG z.B. Anlagen, die auf Grund ihrer Beschaffenheit oder auf Grund des Betriebes schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen können. Anlagen dieser Art müssen von der zuständigen Genehmigungsbehörde genehmigt werden. Die Anlage in Neuerkerode ist beim Staatlichen Gewerbeaufsichtsamt Braunschweig genehmigt worden.

Die vorliegenden Genehmigungsunterlagen stammen aus dem Jahr 1996 und sind nach Austausch eines der drei installierten Heißwasserkessel (Nahwärmekessel) erstellt worden. Als zusätzliche Änderung der Genehmigungsunterlagen ist die Nachrüstung einer Fernumschaltung der Brennstoffversorgung für die gesamte Anlage eingetragen worden. Die Kategorisierung dieser Anlagen erfolgt nach der 4.BImSchV (Verordnung über genehmigungspflichtige Anlagen).

Der Betrieb der Anlage erfolgt nach TRD 604 (Technische Regeln für Dampfkessel, Betrieb von Dampferzeugern der Gruppe IV ohne ständige Beaufsichtigung) und erfordert mehrere sicherheitstechnische Einrichtungen am Kessel sowie das Führen eines Betriebsbuches in dem die tägliche Funktionsprüfung der Sicherheitseinrichtungen, die Bestätigung der halbjährlichen Wartungen, die Ergebnisse der betrieblichen Wasseruntersuchungen sowie alle Störfälle einzutragen sind.

Zu den Sicherheitseinrichtungen gehören nach TRD 604 z.B. eine regelbare Beheizung der Kessel, um den Druck bzw. die Temperatur jedes Dampferzeugers einzeln zu regeln und weiterhin ein Druckbegrenzer, der die Beheizung außer Betrieb nimmt und verriegelt, wenn der zulässige Kesseldruck überschritten wird. Der Kesselwasserstand muss durch einen Wasserstandsregler in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Dies wird durch eine Wassermangelsicherung und einen Füllstandsbegrenzer erreicht.

Außerdem muss eine Kesselspeisewasser-Aufbereitungsanlage vorhanden sein. Sie besteht in der behandelten Neuerkeröder Anlage aus einem Sprüh-Umlauf-Entgaser für Mischwasser (Kondensat und Permeat aus Umkehr-Osmose-Anlage) und einer Wasserenthärtungsanlage sowie der genannten Umkehr-Osmose-Anlage.

Die Speisewasseraufbereitung nach TRD 611 (Kessel- und Speisewasser von Dampferzeugern der Gruppe IV) erfolgt direkt im Kesselhaus und erfordert die regelmäßige Analyse des Speisewassers durch das Personal. Da Salze und Reste von Schwebstoffen im Wasser zu Schlamm- und zur Erhöhung der Leitfähigkeit des Kesselwassers im unteren Bereich der Dampfkessel führen, müssen diese häufiger abgeschlamm- und abgeklärt werden. Die Leitfähigkeit des Speisewassers ist der Wert, nach dem sich die tägliche Abschlämmwassermenge richtet. (Die Ermittlung dieser soll jedoch nicht weiter behandelt werden.)

Abgeschlamm- und abgeklärt werden die Kessel über ein Abschlämmventil, das durch eine Schaltuhr angesteuert wird, die über eine vorgegebene Öffnungsdauer des Abschlämmventils und ein Schaltintervall verfügt. Die Einstellung erfolgt manuell und kann vom Kesselwärter entsprechend der Wasseranalysen des Speise- und Kesselwassers eingestellt werden, um die vorgegebenen Toleranzen bezüglich der Anforderungen an Kessel- und Speisewasser nach TRD 611 einzuhalten.

Alle Sicherheitseinrichtungen der Anlage können zur Funktionsprüfung manuell ausgelöst werden. Die Funktionsprüfung im Betrieb ist nach TRD 604 vorgeschrieben und muss alle 24 Stunden durchgeführt werden.

2.1.2 Skizze mit wichtigen Komponenten

Eine Skizze der wichtigen Komponenten der Dampfversorgung kann nachfolgender Skizze entnommen werden. Für die erwähnten Behälter und Pumpen wird je ein Aufmaß gemacht.

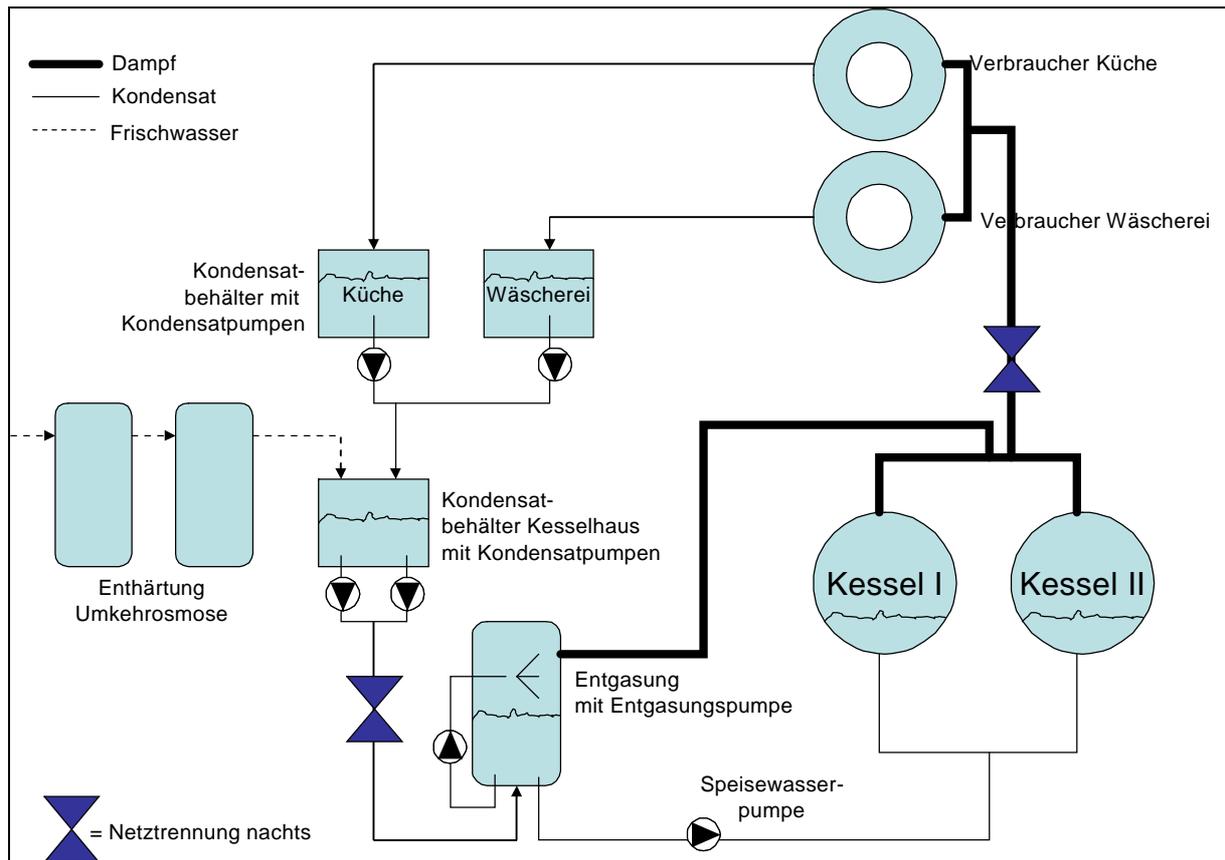


Bild 4 Skizze der Kesselanlage mit wichtigen Komponenten

2.1.3 Betrieb der Anlage

Alle wichtigen Aggregate verfügen über Betriebsstundenzähler, anhand derer die jährlichen Laufzeiten festzustellen sind. Es wird jedoch nur über die Brennerlaufzeiten Buch geführt.

Wochentags wird in zwei Schichten gearbeitet. Arbeitsbeginn der ersten Schicht ist um 5:00 Uhr. Die Ablösung durch die Spätschicht erfolgt um 11:45 Uhr. Schichtende ist um 17:45 Uhr. Am Wochenende sieht der Schichtplan nur eine Schicht von 6:00 – 13:00 Uhr vor. In jeder Schicht wird Protokoll geführt. Probleme jeglicher Art an der Anlage beheben die Kesselwärter, wenn möglich sofort.

Die Dampferzeuger selbst sind immer in Betrieb. Das Netz wird nachts manuell abgetrennt. Alle Sicherheitsfunktionen und Überwachungseinrichtungen funktionieren mit alter Steuerungs- und Regelungstechnik. Die installierten Hilfsaggregate, wie Brennermotoren, Pumpen, etc. werden ebenfalls mit dieser Technik angesteuert.

Die Steuerung der Kondensatpumpen in Küche und Wäscherei erfolgt dezentral über den jeweils dort installierten Schaltschrank. In der Zentrale können Fehlfunktionen oder Defekte von dort eingebauten Anlagenteilen daher nicht angezeigt werden.

Zur Überwachung der Anlage sind in den Hauptleitungen zu den Verbrauchern nur dann Manometer installiert, wenn die entsprechende Leitung durch einen Druckregler von der Hauptzuleitung getrennt ist.

Thermometer sind überhaupt nicht vorgesehen. Dies ist prinzipiell auch nicht nötig, da Druck und Temperatur in einem Dampfnetz immer zusammengehören. Jedoch kommt es hinter Druck-Regelarmaturen oft zu einer Überhitzung des Dampfes, die ohne Thermometer nur geschätzt werden kann. Da beispielsweise im Wäschereikeller einige der installierten Mano-

meter nicht funktionieren, kann der Druck in den entsprechenden Leitungen ebenfalls nur geschätzt werden.



Bild 5 Schaltschrank der Dampftechnik mit Wasserstandsregler und Füllstandsanzeigen für Kessel und Speiswasserbehälter

2.2 Dampferzeugung

In diesem Kapitel werden alle für die Dampferzeugung benötigten Aggregate vorgestellt. Wichtig sind hier die technischen Daten und die Betriebsart.

2.2.1 Kessel und Brenner



Bild 6 Dampfkessel mit modulierenden Elco Zweistoffbrennern

Technische Daten der Kessel laut Typenschild:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| • Hersteller: | Wilke Werke AG Braunschweig |
| • Baujahr: | 1973 |
| • Leistung: | 1,6 t/h |
| • Wärmetauscherfläche: | 40m ² |
| • max. zul. Betriebsüberdruck: | 13bar |

In Bild 6 ist sehr gut die zweifache Brennstoff-Zuführung zu erkennen. Rechts im Bild befindet sich die Gasrampe für Brenner II (in der Bildmitte). Links daneben sind sehr gut die Ölschläuche für die Ölfeuerung zu sehen.

Oben am Kessel befinden sich die Sicherheits- und Regeleinrichtungen. In den Thermographieaufnahmen (Bild 7, Bild 8) ist gut erkennbar, dass die Kessel selbst an der gedämmten Kesseloberfläche sehr heiß sind (ca. 60°C). Dies lässt auf eine unzureichende Wärmedämmung schließen. Welches hohe Temperaturniveau auf der gedämmten Kesseloberfläche und an den ungedämmten Stellen herrscht, ist in den Bildern eingetragen (ca. 110°C). Die Luft im Kesselhaus ist entsprechend warm.

In der unteren rechten Bildecke sind einige Sicherheits-Armaturen zu erkennen. Diese sind ungedämmt und nehmen fast die gesamte rechte Kesselseite der Dampferzeuger ein. Hier sind hohe Wärmeverluste zu vermuten. Ebenso an den Reinigungsklappen, z.B. an der Abgaswendekammer im hinteren Bereich des Kessels. Das Temperaturniveau der Sicherheitsarmaturen an den Kesseln ist ebenfalls sehr hoch.

Die Abschätzung der bei der Dampferzeugung daher anfallenden Wärmeverluste an den Kesseln erfolgt in Kapitel 4.1.



Bild 7 Thermographieaufnahmen am Dampfkessel II (Oberfläche)

Da es sich bei der Anlage laut Vorschriften nach BImSchG (Erster Abschnitt) um eine genehmigungspflichtige Anlage handelt, wird alle drei Jahre eine wiederkehrende Einzelmessung vom TÜV, nach § 28 BImSchG durchgeführt. Das BImSchG umfasst Luftverunreinigungen, Geräuschemissionen oder Erschütterungen, die von diesen Anlagen hervorgerufen werden können.

Die letzte Messung nach § 26 BImSchG wurde im Februar 2008 vom TÜV-Nord durchgeführt. Alle Messwerte lagen an beiden Kesseln weit unterhalb der zulässigen Grenzwerte aus

den Genehmigungsunterlagen (1996) der Anlage. Die Anlage darf daher ohne Einschränkungen betrieben werden.

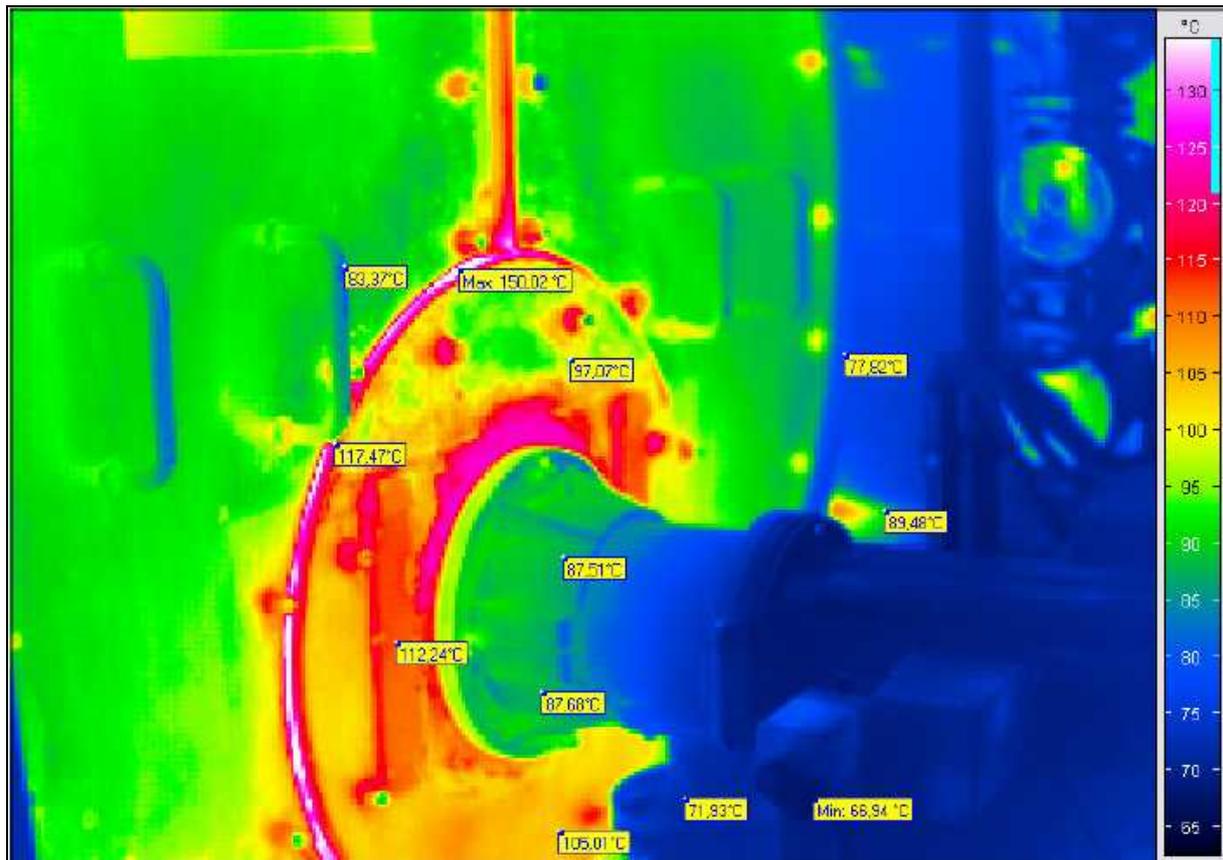


Bild 8 Thermographieaufnahme der Kesselfronn am Kessel II

Die installierten Brenner sind stufenlos geregelte Zweistoffbrenner. Es liegen technische Unterlagen vor. Die wichtigsten Daten der Brenner sind:

- Hersteller: Elco
- Typ: ELG 4,120 R-P (stufenlos geregelt)
- Baujahr: 1987
- Brenner I: 1.143 kW
- Brenner II: 855 kW
- Leistungsaufnahme (el.): 2.200W
- Feuerungsautomat: Landis&Gyr; LGK 16.322A27/LGK 16.333A2
- Brennerleistung (Gas): 160 – 1.400 kW
- Brennerleistung (Öl): 33 – 118 kg/h

Die Betriebsart (Gas- oder Ölbetrieb) wird über die Kesseldruckregelung angesteuert. Die Verbrennungsluftzufuhr erfolgt direkt über die Luft im Kesselhaus, es gibt keinen Verbrennungsluftkanal.

2.2.2 Brennersteuerung

Grundsätzlich erfolgt die Ansteuerung der Brenner über Druckfühler, die an den Dampfkesseln angebracht sind. Der Sollwert des Druckes im Kessel ist auf $p_{\bar{u}}=12$ bar eingestellt. Um den Druck auch bei unterschiedlichster Dampfabnahme möglichst konstant zu halten, werden modulierende (stufenlos geregelte) Brenner verwendet. Angesteuert werden diese über eine stetige Druckregelung, welche die Brennerleistung im Modulationsbereich stetig dem Bedarf anpasst.

Über Füllstandsmessgeräte werden die Speisewasserpumpen (Seitenkanalpumpen) angesteuert, welche Kondensat aus dem oberen Bereich des Speisewasserbehälters auf 1,3-faches Kesseldruckniveau bringen und so den Flüssigkeitsstand der Kessel innerhalb der Toleranzen halten.

Die Brenner werden entweder bei Erreichen des eingestellten Dampfdruckes abgeschaltet oder durch eine Sicherheitsabschaltung. Diese kann z.B. durch Hochwasser oder Wassermangel, zu hohem Druck oder eine Störung am Brenner selbst ausgelöst werden (Anlagenschema s. Anhang II).

Da die zwei Kessel als ein zusammenhängendes System angesehen werden können, ist keine Kesselfolgeschaltung vorhanden. Die Kesselbeanspruchung ist also entsprechend annähernd gleich. Geht ein Brenner auf Störung, wird der Kessel von Hand abgeriegelt und der zweite Kessel kann weiter arbeiten. Die Kesselwartung erfolgt jährlich. Die Anlage wird in diesem Fall zwei Wochen lang jeweils nur mit einem Kessel betrieben.

2.2.3 Speisewasseraufbereitung und Entgasung

Für den Betrieb einer Dampfkesselanlage müssen alle im Wasser gelösten Gase, wie z.B. Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid entfernt werden. Deshalb wird neben den Dampfkesseln auch ein Umlauf-Sprüh-Entgaser zur thermischen Entgasung des Kesselspeisewassers betrieben und geregelt.

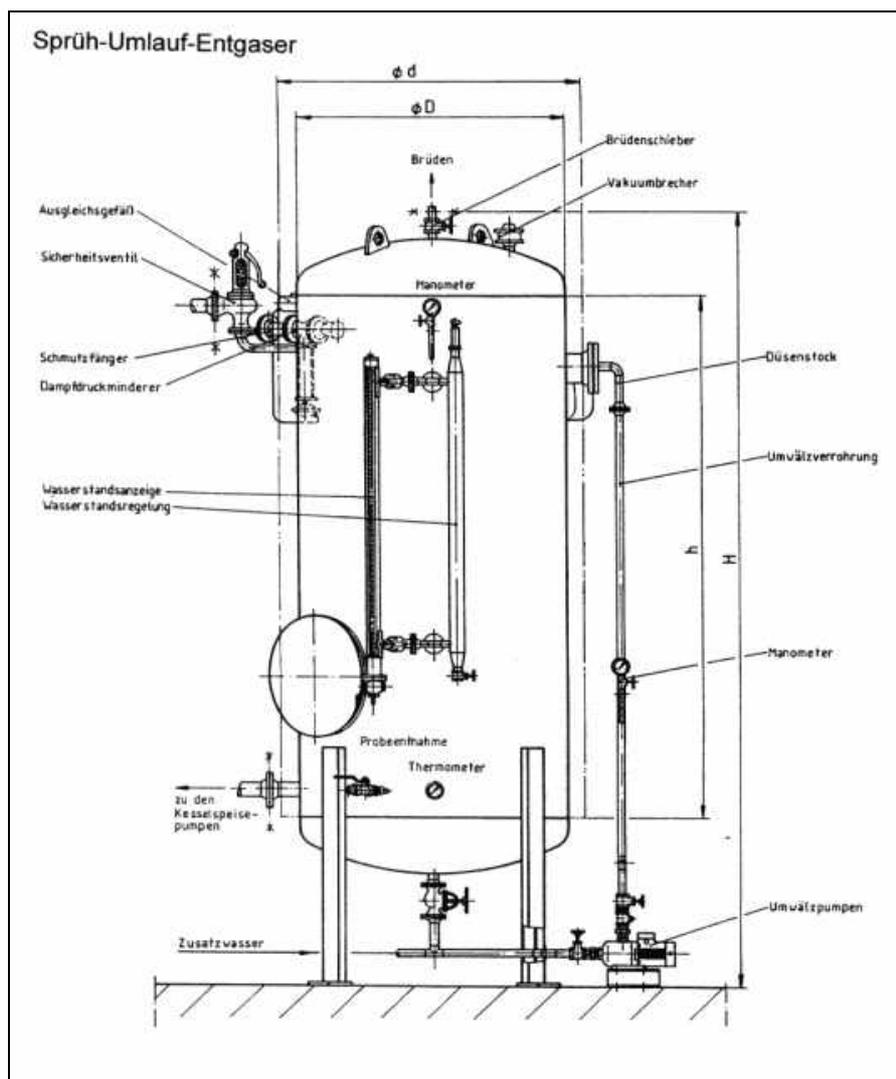


Bild 9 Aufbau eines Umlauf-Sprüh-Entgasers mit Beschriftung einzelner Komponenten

Hier ist wie auch in den Dampfkesseln eine Niveausonde installiert, welche eine Kondensatpumpe ansteuert. Diese befördert Kondensat aus dem Kondensatbehälter in den Speisewasser-Entgaser. Der Arbeitsüberdruck im Speisewasserbehälter beträgt ca. 0,2 bar. Das entspricht einer Dampftemperatur von ca. 105 °C.

Arbeitsprinzip: Es wird ständig Wasser aus dem unteren Bereich des Behälters (Vorratsbehälter) mit frischem Zusatzwasser nach oben in den Ausdampfraum gepumpt und dort über eingebaute Düsen so fein versprüht, dass sich die nach unten rieselnde Flüssigkeit sofort im Gegenstromprinzip auf Siedetemperatur erwärmt. Die darin gelösten Gase werden auf diese Weise ausgetrieben und mit dem Trägerdampf nach oben über den Brüdenschieber ins Freie geleitet. Die Dampfverluste hierbei sind minimal.

Die Entgasung erfolgt ständig (im Umlauf), daher muss der Behälter auch ständig mit Frischdampf versorgt werden. Dies geschieht über eine Dampfzange, die im oberen Bereich des Speisewasserbehälters liegt. Der für den Abtransport der Gase erforderliche Innendruck des Behälters wird über einen vorgeschalteten Dampfdruckregler konstant gehalten.

Über den in Bild 10 dargestellten Düsenstock – hier im ausgebauten Zustand wegen einer Wartung – wird der Wasserebel verteilt und erhitzt, bzw. entgast.



Bild 10 Entgaserdüsenstock



Bild 11 Wasseraufbereitung

Das beigemischte Permeat ist enthärtetes Rohwasser, welches über eine Wasserenthärtungsanlage im Ionenaustauscherprinzip auf einen minimalen Härtegrad gebracht wird. Über die nachgeschaltete Umkehr-Osmose-Anlage werden die Resthärte sowie organische Restsubstanzen aus dem Wasser gefiltert.

Im Kondensatbehälter wird das vorbereitete Permeat mit dem ständig umlaufenden Kondensat gemischt. So werden die betriebsbedingten Medienverluste durch Brüden, Abschlammung und eventuelle Undichtheiten gedeckt.



Bild 12 Oberer Bereich des Umlauf-Sprüh-Entgasers

Um die Grenzwerte der TRD 611 für das Kesselwasser einzuhalten, müssen die Dampferzeuger regelmäßig abgeschlammmt werden. Dies geschieht mittels einer Zeitschaltuhr, an welcher die Abschlammhäufigkeit und die entsprechende Öffnungsdauer des Abschlammventils manuell durch den Kesselwärter eingestellt werden kann. Die Speisewasserqualität wird ebenfalls ständig durch den Kesselwärter analysiert und protokolliert.

- Hersteller: Berkefeld – Filter
- Baujahr: unbekannt
- Leistung (max.): 4,5 t/h
- zul. Betriebsüberdruck: 1,0 bar
- zul. Betriebstemp.: 120°C
- Inhalt Druckraum: 3.900 l
- Betriebsart: dauerhaft

Rechts im Bild ist der angeflanschte Düsenstock zur Entgasung zu sehen. Zirkulierendes Wasser wird dort im oben liegenden Dampfpolster erhitzt und auf diese Weise thermisch entgast. Dies erfolgt mit Hilfe der Entgasungspumpe.



Bild 13 Entgasungspumpe

Daten der Entgasungspumpe laut Typenschild:

- Hersteller: Grundfos
- Art: mehrstufige Kreiselpumpe
- elektr. Leistungsaufnahme: 750 W
- Förderhöhe: 17,2 m
- Fördervolumenstrom: 8 m³/h
- Betriebsart: dauerhaft

Das fertig aufbereitete und entgaste Wasser wird mit der Speisewasserpumpe wieder zurück in den Dampfkreislauf gebracht.



Bild 14 Speisewasserpumpe mit Elektromotor und Dichtmanschettenentwässerung

Motor:

- Hersteller: BBC – Brown Boveri & Cie
- elektr. Leistungsaufnahme: 5,5kW
- Schaltungsart: $\Delta 380V$
- Stromaufnahme: 11,3A, $\cos\varphi=0,89$

Pumpe:

- Hersteller: Sterling SIHI
- Art: Seitenkanalpumpe
- Typ: CDHL 1403
- max. Förderhöhe: 250 m
- max. Fördervolumenstrom: 4m³/h
- max. Betriebstemperatur: 120°C
- Betriebsart: über Füllstandsregelung des Kessels angesteuert

Um die Speisewasserpumpen mit ausreichend Vordruck zu versorgen, ist unterhalb des Speisewasserbehälters eine sog. Boosterpumpe installiert. Diese ist ebenfalls eine Seitenkanalpumpe mit 1.100 W elektrischer Leistungsaufnahme.

2.2.4 Kondensatbehälter und Kondensatpumpen im Kesselhaus

Das von den Verbrauchern zurückkommende Kondensat wird in einem Behälter gesammelt, um anschließend mit einer Kondensatpumpe wieder zurück in den Kessel gepumpt zu werden. Abmessungen des Behälters: L ca. 2,20 m x B ca. 1,10 m x H ca. 1,10 m.



Bild 15 Kondensatbehälter im Kesselhaus

Motor:

- Hersteller: Grundfos
- elektr. Leistungsaufnahme: 1,1kW
- Schaltungsart: Y 380-415V
- Stromaufnahme: 4,6A

Pumpe:

- Hersteller: Grundfos
- Art: mehrstufige Kreiselpumpe
- Typ: CR8
- max. Förderhöhe: 24,5m
- max. Fördervolumenstrom: 9,5m³/h
- max. Betriebstemperatur: 120°C
- Betriebsart: durch Schwimmer in Speisewasserbehälter angesteuert

Durch die Sanierungsarbeiten am Netz im Sommer 2008 war der Bereich der erdverlegten Leitungen vor der Küche frei gelegt und begehbar. Der Zustand der Rohre sowie der Wärmedämmung ist dort gut erkennbar.

Neben der Dampfleitung liegt ebenfalls die Kondensatleitung in der Erde. Das Kondensat wird sowohl in der Wäscherei als auch in der Küche in Kondensatbehältern gesammelt und über Förderpumpen in die Sammelleitung und zurück in das Kesselhaus gepumpt. Die Kondensatpumpen werden über einen Schwimmerschalter angesteuert.

Nach Informationen durch Mitarbeiter der Stiftung ist die größte Schwachstelle des Netzes die Außenkorrosion an den Erdleitungen, die vermutlich auf Schäden in der Außenhaut der Dämmung zurückzuführen ist. Diese Problematik gilt jedoch nicht nur für das Dampfnetz, sondern auch für das Nahwärmenetz in der Liegenschaft.

Die Leitungen in den Gebäuden sind überwiegend alt und teilweise sehr schlecht bis gar nicht gedämmt. Die Erdleitungen sind in einem wesentlich besseren Zustand. Da diese im Jahr 2000/01 vollständig saniert worden sind, fallen die Wärmeverluste hier wesentlich kleiner aus. Der einzige Teil, der in einem sehr schlechten Zustand ist, ist der Gebäudeanschlussbereich der Küche. An dieser Stelle ist durch einen Schaden an der Dampfleitung Feuchtigkeit in die Wärmedämmung eingedrungen, wodurch eine Sanierung dieses Abschnitts unumgänglich ist.

Eine Zusammenstellung der vorgefundenen Leitungslängen wird zusammen mit deren Wärmeverlusten in Kapitel 4.2 gegeben.

Dezentrale Kondensatbehälter und Kondensatpumpen

Weiterhin ist zu beobachten, dass einige der Kondensatableiter undicht sind. Die Verluste, die sich hieraus ergeben, müssen durch Zusatzwasser ausgeglichen werden. Ein Kondensatableiter ist in Bild 18 zu sehen.

Die Kondensatpumpe in der Wäscherei ist eine im Behälter hängende Pumpe, mit aufgesetztem Motor (Bild 19). Der Zustand ist äußerst marode. Die Wärmedämmung ist beschädigt und der Flansch an der Pumpenwelle ist undicht. Außerdem werden die Vibrationen des Pumpenmotors auf das gesamte Kondensatleitungsnetz im Wäschereikeller übertragen.



Bild 18 Undichter Kondensatableiter im Wäschereikeller



Bild 19 Kondensatbehälter mit Pumpe in der Wäscherei

Abmessungen des Behälters L 1,46 m x B 1,0 m x H 0,75 m

Motor:

- Hersteller: AEG; AM90CX2
- elektr. Leistungsaufnahme: 2,2kW
- Drehzahl: 2.820 min⁻¹
- Betriebsart: angesteuert über Schwimmerschalter

Über die installierte Pumpe sind auf Grund fehlender Unterlagen keine Angaben möglich.



Bild 20 Kondensatbehälter und Kondensatpumpe in der Küche

Abmessungen des Behälters: L 1,46 m x B 1,0 m x H 0,75 m

Motor:

- Hersteller: Sterling SIHI
- elektr. Leistungsaufnahme: 0,55 kW
- Betriebsart: angesteuert über Schwimmerschalter

Die Pumpe ist eine Seitenkanalpumpe des Herstellers Sterling SIHI, die ähnlich der Speisewasserpumpen bzw. der Boosterpumpe an den Kesseln ist.

2.4 Aufnahme der Dampfabnehmer

Die Dampfverbraucher wurden in der Diplomarbeit von Nadine Sänger erfasst. Bei der Begehung und mit Hilfe technischer Unterlagen wurden die Leistungswerte der Geräte erfasst. Anhand einer Befragung der Mitarbeiter konnte die ungefähre Laufzeit aller Geräte ermittelt werden. Aus beiden Angaben ergeben sich ein Abnahmeprofil über die Woche sowie eine Jahresdampfabnahmemenge.

2.4.1 Küche

Die Ergebnisse der Aufnahme aller Verbraucher der Kche sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen. Es sind nur die Dampfabnehmer gelistet. Eine komplette Liste auch der strom- und gasverbrauchenden Geräte findet sich im Gebaudebericht der Küche (siehe Endbericht 04 "Gebäude").

		Anzahl	Dampf	Strom	Betrieb
Nr.	Geräte		kg/h	kW	h/d
	Niederdruck-Dampf- Kochkessel				
1	NDD-Kippkochkessel, 60 Liter	1	37		1,5
2	NDD-Kippkochkessel, 80 Liter	1	50		1,5
3	NDD-Kippkochkessel, 100 Liter	4	200		1,5
4	NDD-Rechteckkochkessel, 225 Liter	1	66		1,5
5	NDD-Rechteckkochkessel, 300 Liter	2	144		1,5
6	NDD-Kessel 150 Liter mit Rührwerk & Rückkühlung	1	60	0,75	1,5
	Ditkchenblock				
7	Kessel 60 Liter	1	37		1
12	Hans-Dampf 10/1	1	18	0,3	1
	Neuere Geräte				
15	Waschstraße	1	82,6	10,6	2,5
	Sonstiges				
	Erhitzer Lüftungsanlage 182 kW	1	16	2	9,5

Tabelle 1 Dampfbetriebene Geräte in der Küche

Es ist vom Gerätehersteller jeweils nur der Anschlusswert für Dampf und nicht der Verbrauchswert für den laufenden Betrieb angegeben. Hier wird in Anlehnung an die Dampfmessungen aus dem Jahr 1998 von einer Minderung des Dampfverbrauchs im Betrieb ausgegangen. Aufgrund fehlender Herstellerangaben wird pauschal für alle Geräte von einer Verringerung um 50 % ausgegangen.

Die Minderung des Dampfverbrauchs ist darin begründet, dass der Anschlusswert die notwendige Leistung im Anfahrzustand beinhaltet, jedoch im laufenden Betrieb nur noch die Temperatur gehalten werden muss. Dies führt zu einer geringeren Leistungsanforderung und somit zu einem sinkenden Dampfverbrauch.

Der dampfversorgte Lufterhitzer ist mit einem mittleren Verbrauch von 16 kg/h berücksichtigt. Der Wert ist für eine mittlere Außenlufttemperatur in der Heizzeit von 6 C errechnet und gibt somit den Durchschnittsverbrauch an Dampf in der Heizzeit wieder.

Eine Zusammenstellung der Verbrauchsmengen über einen Tag ergibt folgende Diagramme.

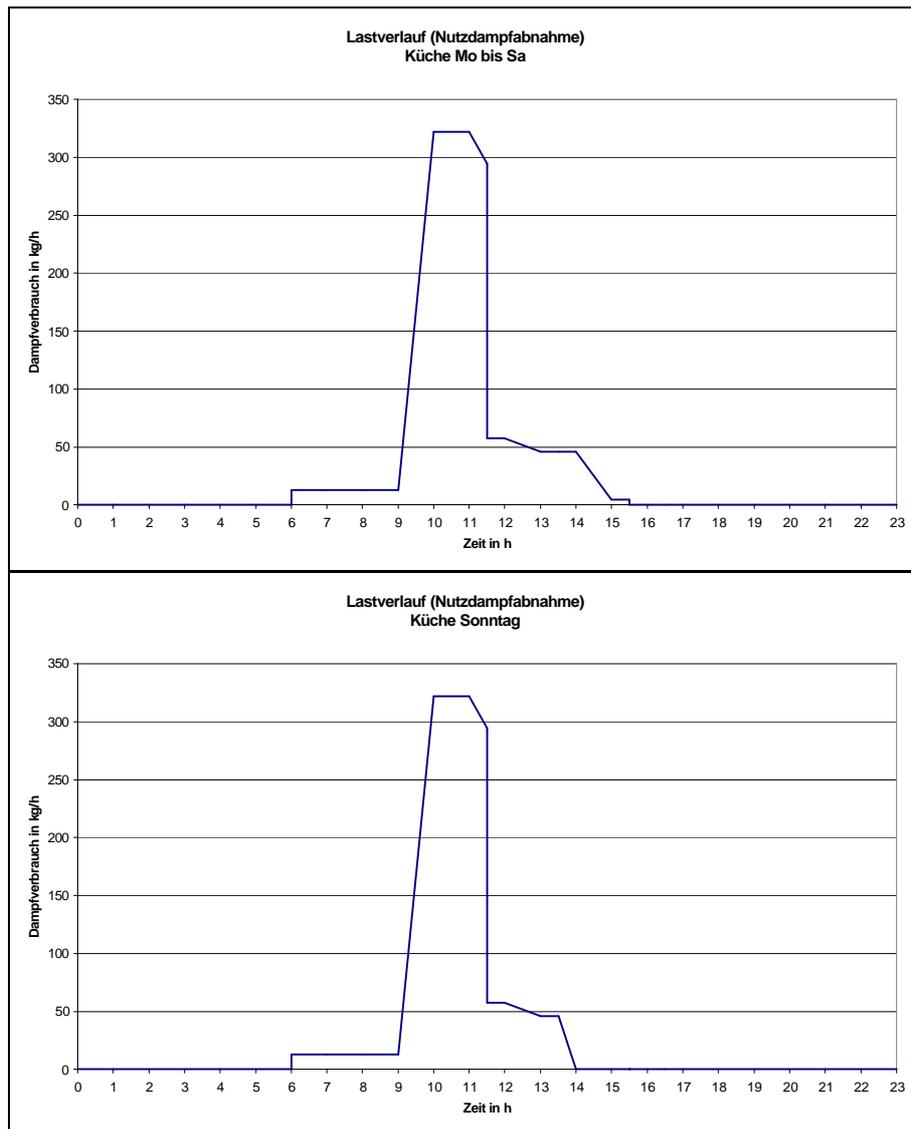


Bild 21 Lastverlauf Dampf für die Küche

Der maximale Dampfverbrauch beträgt hiernach 320 kg/h. Das entspricht in etwa einer Leistung von 250 kW. Die minimale Leistung ab 6.00 bis 10.00 Uhr und von 14.00 bis 15.30 Uhr kommt durch den Lüfterhitzer zustande.

Die Spitzenlast um 11.30 Uhr entsteht durch den Arbeitsbeginn der Spülstraße, die sich noch mit der Essensbereitung überschneidet. Der Verbrauch ab 12.00 Uhr ist der Spülstraße zugeschrieben. Insgesamt ist der Dampfverbrauch jedoch wesentlich geringer als in der Wäscherei.

Die Gesamtdampfmenge beträgt innerhalb eines Jahres (geschätzt aus den Laufzeiten und Anschlusswerten der Abnehmer) etwa 239.000 kg/a.

2.4.2 Wäscherei

Die Ergebnisse der Aufnahme aller Verbraucher der Wäscherei sind nachfolgend tabelliert. Es sind nur die Dampfnehmer gelistet. Eine komplette Liste auch der strom- und gasverbrauchenden Geräte findet sich – wie bei der Küche – im Gebäudebericht der Wäscherei (siehe Endbericht 04 "Gebäude").

Nr.	Geräte	Dampf kg/h	Strom kW	Betrieb h/d
2	Waschstraße LT 25-9	610	10,3	9,5
4	Trockner TT 735 DU/UG 900 (2 Stck.)	je 425	9,6	9,5
5	Trockner FL 623 D	250	3,65	9,5
6	Waschschleudermaschine LX 308	?	7,5	9,5
7	Mangel LR	450		1,5
8	Doppel-Rumpf-Kabinett	40	6,5	1,5
9	Kragen-Rev. Presse	8		1
10	Ärmel-Presse	12		1

Tabelle 2 Dampfverbrauchende Geräte in der Wäscherei

Es sind vom Gerätehersteller der Anschlusswert für Dampf und der Verbrauchswert für den laufenden Betrieb angegeben. Es wird im Mittel für alle Geräte von einer Verringerung von 50 % ausgegangen (siehe Kapitel 2.4.1). Die Minderung des Dampfverbrauchs ist darin begründet, dass der Anschlusswert die notwendige Leistung im Anfahrzustand beinhaltet, jedoch im laufenden Betrieb nur noch die Temperatur gehalten werden muss. Dies führt zu einer geringeren Leistungsanforderung und somit zu einem sinkenden Dampfverbrauch.

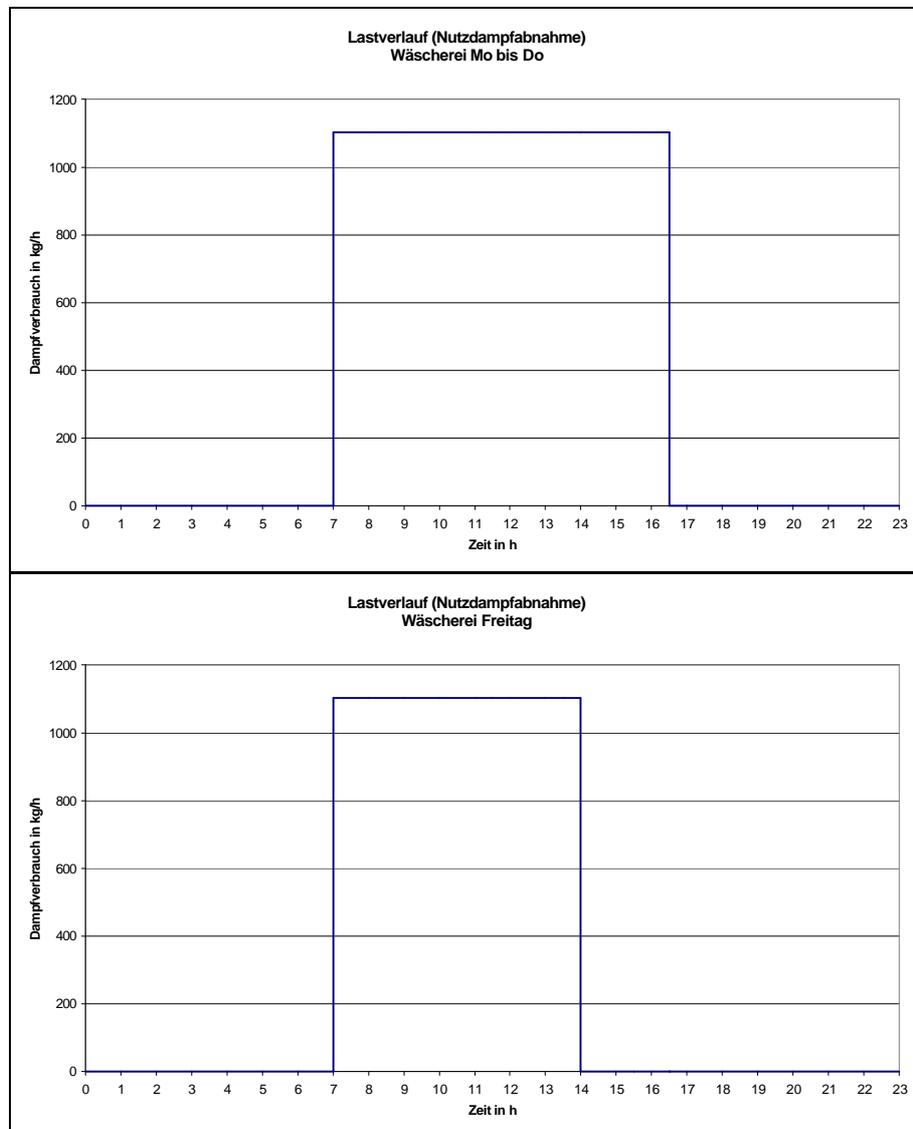


Bild 22 Lastverlauf Dampf für die Wäscherei

Eine Zusammenstellung der Verbrauchsmengen ergeben die Diagramme über den Lastverlauf eines Tages - Bild 22. Bei den Geräten, die nur zu bestimmten Tagen oder für wenige Stunden in Betrieb sind, ist die Dampfmenge auf die Betriebszeit eines Arbeitstages aufgeteilt. Dadurch ergibt sich ein mittlerer Dampfverbrauch, der die Spitzenlast nicht mit darstellt.

Der mittlere Dampfverbrauch beträgt hiernach etwa 1100 kg/h. Das entspricht in etwa einer Leistung von 850 kW. Insgesamt ist der Dampfverbrauch jedoch wesentlich höher als in der Küche. Die Gesamtdampfmenge beträgt innerhalb eines Jahres (geschätzt aus den Laufzeiten und Anschlusswerten der Abnehmer) etwa 2.581.000 kg/a.

2.4.3 Überblick

Der gesamte Dampfverbrauch für Küche und Wäscherei ist im folgenden Diagramm über der Zeit aufgetragen. In der Woche ist sowohl die Küche als auch die Wäscherei in Betrieb. Am Samstag und Sonntag ist nur die Küche im Betrieb.

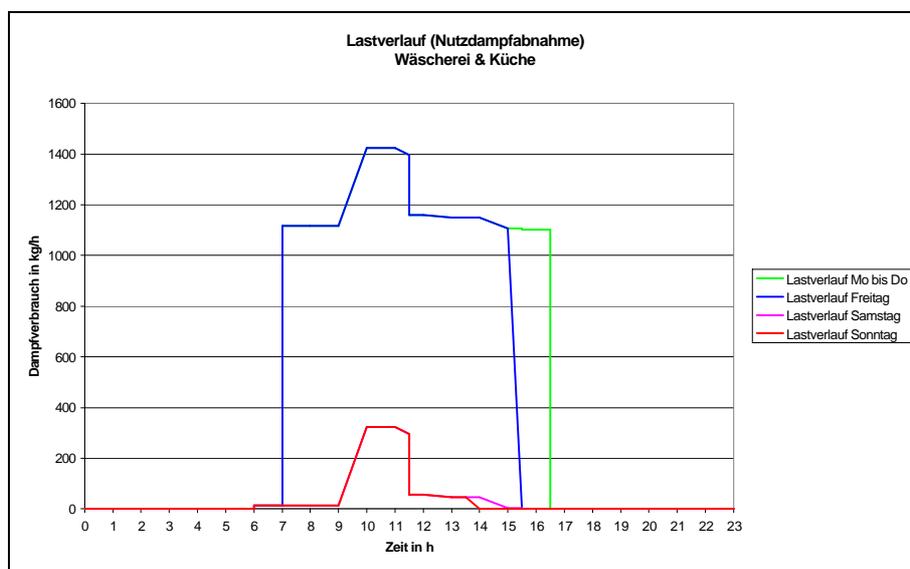


Bild 23 Lastverlauf Dampf für Wäscherei & Küche

Die Dampfmengen in der Küche sind wesentlich geringer als in der Wäscherei. An den Wochentagen von Montag bis Donnerstag ergibt sich ein Verhältnis von 6 % für die Küche und 94 % für die Wäscherei. Wird der Dampfverbrauch über eine Woche betrachtet erhöht sich der Anteil der Küche etwas, da diese zwei Tage länger in Betrieb ist. Dadurch ergibt sich über das Jahr ein Anteil von 9 % für die Küche und 91 % für die Wäscherei.

Wochentag	Betrieb	Dampfmenge	Anteil
Mo bis Do	Wäscherei	10478 kg/d	94 %
	Küche	661 kg/d	6 %
Freitag	Wäscherei	7720 kg/d	91 %
	Küche	661 kg/d	9 %
Samstag	Wäscherei	0 kg/d	0 %
	Küche	661 kg/d	100 %
Sonntag	Wäscherei	0 kg/d	0 %
	Küche	631 kg/d	100 %
Über eine Woche	Wäscherei	49630 kg/Woche	91 %
	Küche	4597 kg/Woche	9 %

Tabelle 3 Aufteilung des Dampfverbrauches

Der Gesamtdampfverbrauch aller Abnehmer beläuft sich über 52 Wochen eines Jahres somit auf: $(49.630 + 4597) \text{ kg/Woche} \cdot 52 \text{ Wochen/a} = 2.820.000 \text{ kg/a}$. Das entspricht ca. 320 kg/h (als Durchschnittswert).

3 Dampfmessung

Zur Untermauerung der Annahmen für das Dampfabnahmeprofil und die Jahresdampfmen- gen wurde parallel eine Dampfmessung durchgeführt. Die Messergebnisse werden nachfol- gend ausgewertet.

3.1 Durchführung der Messung

In der Hauptdampfleitung im Kesselhaus ist oberhalb der Dampfkessel eine Messblende zur Erfassung des Dampfmassenstromes installiert. Diese wurde seit 1998 nicht mehr genutzt. Um den Dampfmassenstrom zu erfassen, wurde die Messeinrichtung wieder in Betrieb ge- nommen. Wegen fehlender technischer Unterlagen (das Gerät wurde gebraucht gekauft) gestaltete sich die Messung insgesamt schwierig.

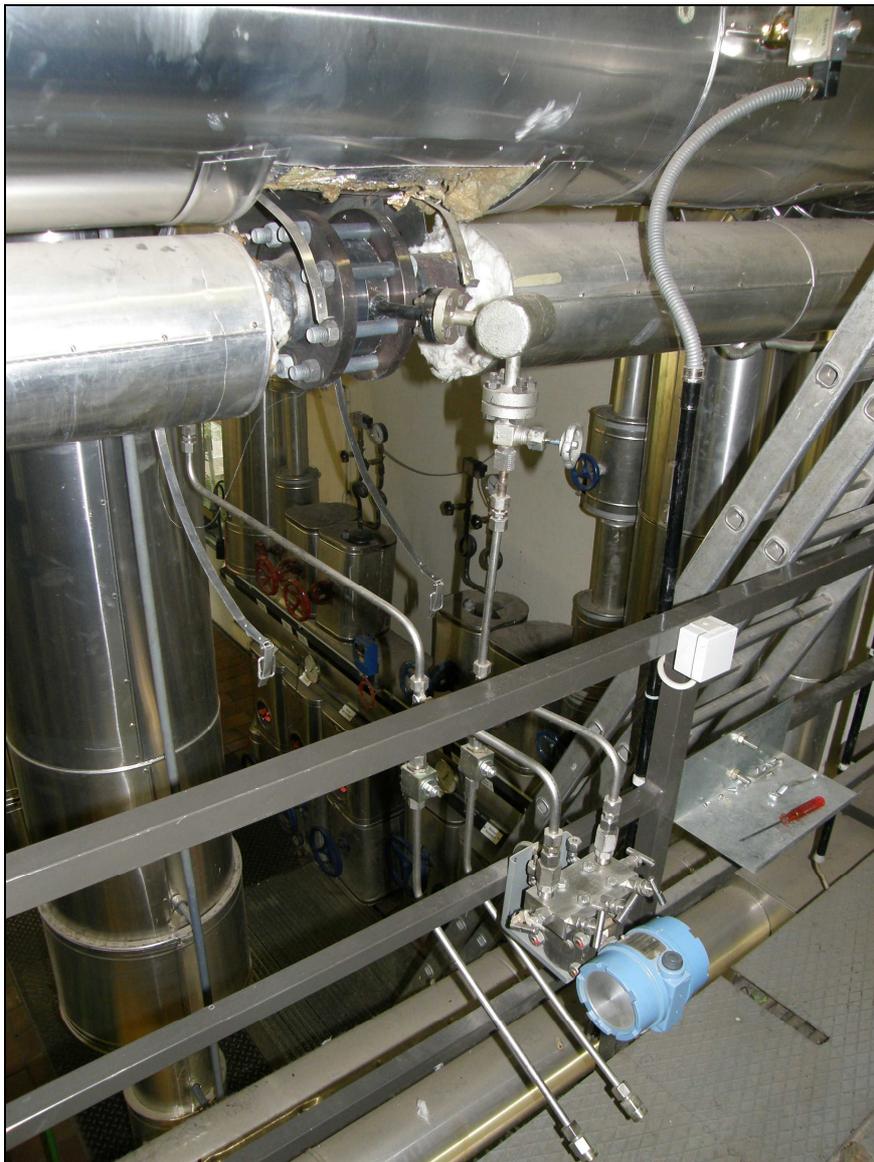


Bild 24 Vorrichtungen für die Dampfmenngemessung

Um den Volumenstrom und so auch den Massenstrom zu messen, sind an der Messblende zwei Differenzdruck-Messstutzen angebracht (Bild 24). Je nach Volumenstrom ändert sich der Differenzdruck zwischen den Stutzen. Erfasst wird dieser Differenzdruck. Ein Messum- former wandelt den Druckwert in ein Stromsignal von 4-20 mA um.

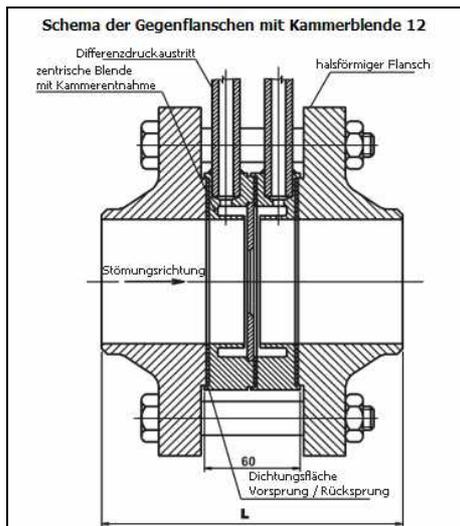


Bild 25 Abbild einer ähnlichen Messblende, wie die in Neuerkerode installierte

Der Wert 4 mA entspricht dabei dem Minimum, d.h. einem Differenzdruck von 0 mbar und damit einem Massenstrom von 0 t/h. Der Wert 20 mA ist das Maximum. Dieses Signal entspricht dem maximalen Differenzdruck von 184,3 mbar. Im Messumformer ist dieser Druckdifferenz der Massenstrom von 4 t/h zugeordnet.

Zwischen beiden Werten (4 ... 20 mA bzw. 0 ... 184,3 mbar) ergibt sich der Massenstrom nicht linear, sondern mit quadratischer Abhängigkeit

Die Umrechnung vom Stromwert [mA] auf den Massenstrom [t/h] erfolgt unter Beachtung der quadratischen Abhängigkeit zwischen Differenzdruck und Volumenstrom (hier Massenstrom; die eventuelle Änderung der Dichte des Dampfes bleibt unberücksichtigt).

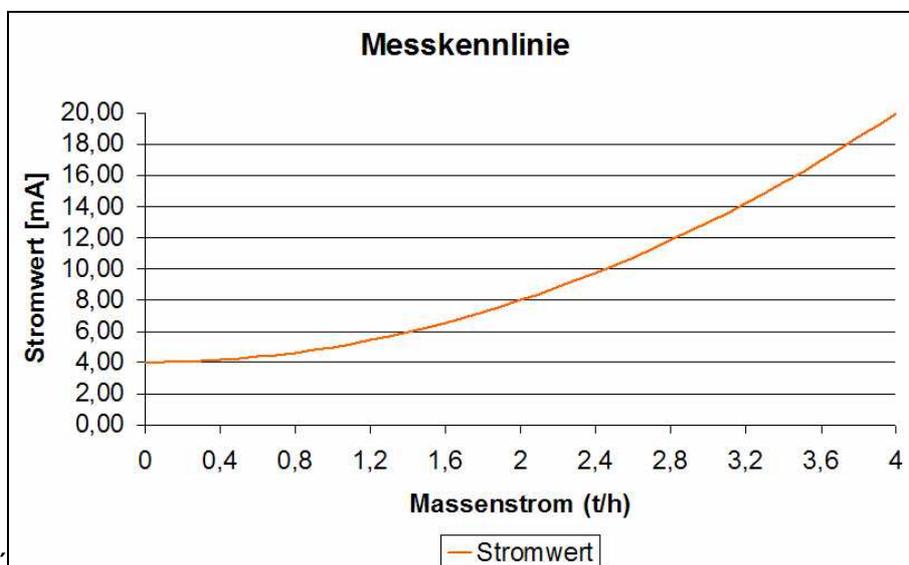


Bild 26 Messkennlinie

Die Blendenkonstante c für den Hydraulischen Widerstand der Blende wird für die weiteren Rechenschritte vernachlässigt, da nur Stromwerte umgerechnet werden müssen, um den Massenstrom zu erhalten. Die Ausgabe des Stromwertes durch den Messumformer erfolgt entlang der Kennlinie der Blende. Die Messkennlinie ist in Bild 26 dargestellt.

Aus der Grafik lässt sich eine Gleichung ableiten, mit der aus allen Strommesswerten I_{Mess} der zugehörige Dampfmassenstrom \dot{m} bestimmt werden kann.

$$\dot{m} = \sqrt{I_{\text{Mess}} - 4 \text{ mA}}$$

Die mittels des Datenloggers gelieferten Daten waren Stromwerte, die mit Hilfe dieser einfachen Umrechnung in Massenströme in t/h überführt worden sind. Die dabei entstandenen Kurven sollen im nächsten Abschnitt etwas genauer analysiert werden.

3.2 Messwertverläufe

Nach Anlaufschwierigkeiten wegen notwendiger Kontaktaufnahme zu den Verantwortlichen der Dampfmessung 1998 wurden im Sommer 2008 Messwerte über eine Woche vollständig erfasst.

Bei der Messung ist alle 10 Sekunden ein Messwert erfasst worden. Während der Messperiode vom 08.07.2008 bis zum 15.07.2008 wurden insgesamt 57.857 Messwerte (Stromwerte) erfasst und anschließend in Dampfmengenmesswerte umgerechnet.

Zu der Messung ist zu sagen, dass es sich hier um "normale" Tage handelt, also keine Feiertage. Die Verläufe sind also repräsentativ für eine anschließende Darstellung der realen Verbrauchsverhältnisse der Dampfanlage.

Wochenbetrieb

Für den Betrieb in der Woche soll repräsentativ der Dampfverbrauch vom Mittwoch den 09.07.2008 gezeigt werden. Bild 27 stellt diesen während der Betriebszeit zwischen 5:00 und 15:30 Uhr dar. Der Mittelwert des Dampfverbrauches in diesem Zeitraum liegt bei 0,91 t/h und ist als rote Linie in der Grafik dargestellt.

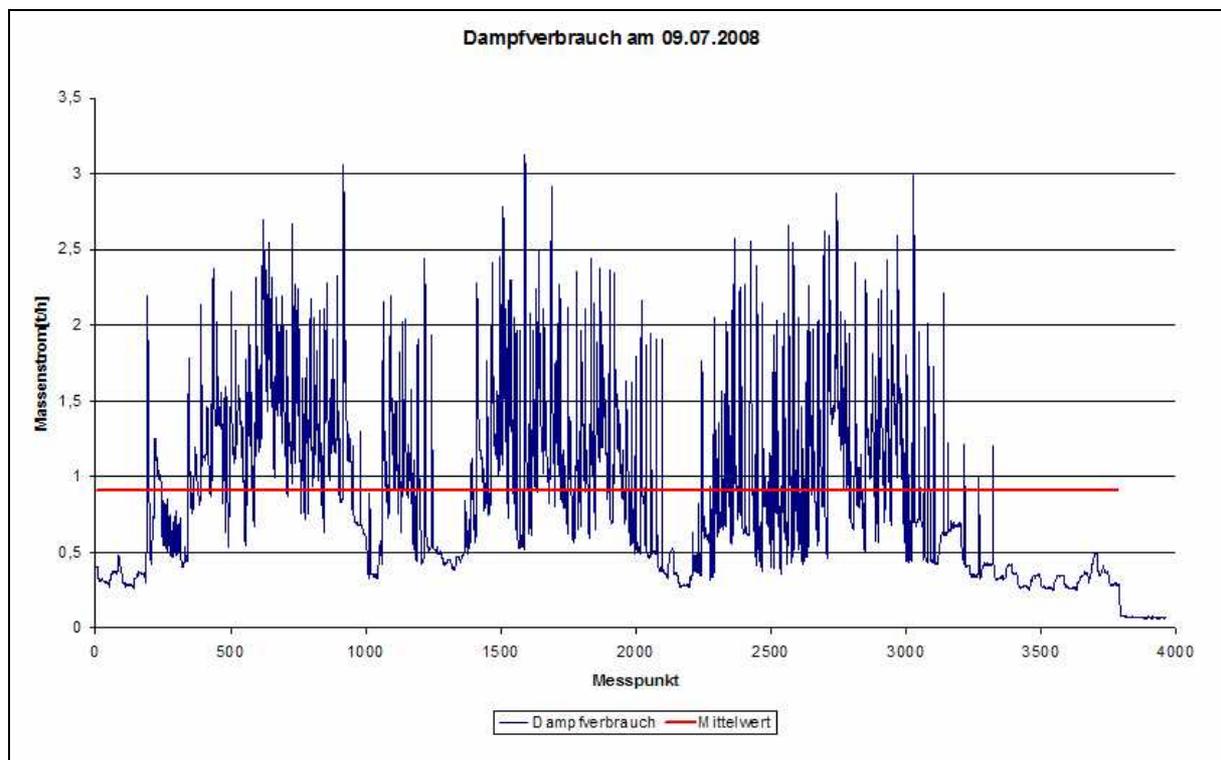


Bild 27 Dampfverbrauchskurve an einem Wochentag von 5:00 bis 15:30 Uhr

Wochenendbetrieb

Für den Betrieb am Wochenende soll repräsentativ der Dampfverbrauch von Samstag dem 12.07.2008 gezeigt werden. Bild 28 stellt diesen mit dem Mittelwert des Dampfmassenstromes von 0,19 t/h (rote Linie) dar.

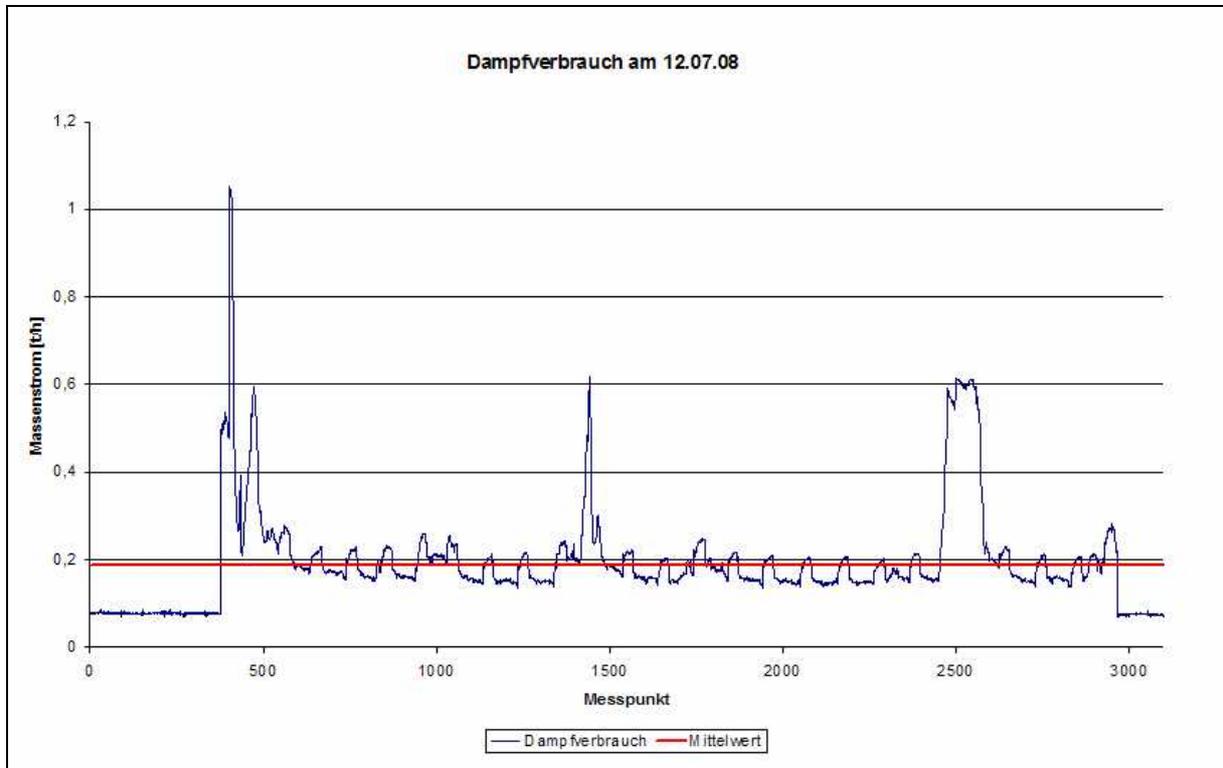


Bild 28 Dampfverbrauchskurve an einem Wochentag von 6:00 bis 13:00 Uhr

Es ist jeweils deutlich zu erkennen, dass zum Arbeitsbeginn im Kesselhaus zuerst das Leitungsnetz freigegeben wird. Dies ist erkennbar anhand des starken Anstieges der Kurven in zu Beginn eines jeden Arbeitstages.

Betriebsbereitschaft

Der dritte Betriebszustand (Betriebsbereitschaft nachts; zur Deckung der Strahlungsverluste der Dampferzeugung), der eine wesentlich Rolle für die energetische Bewertung spielt, soll ebenfalls grafisch vorgestellt werden. Dazu wird die Verbrauchskurve der Betriebsbereitschaftszeit zwischen dem 12.07. und dem 13.07.2008 in Bild 29 abgebildet.

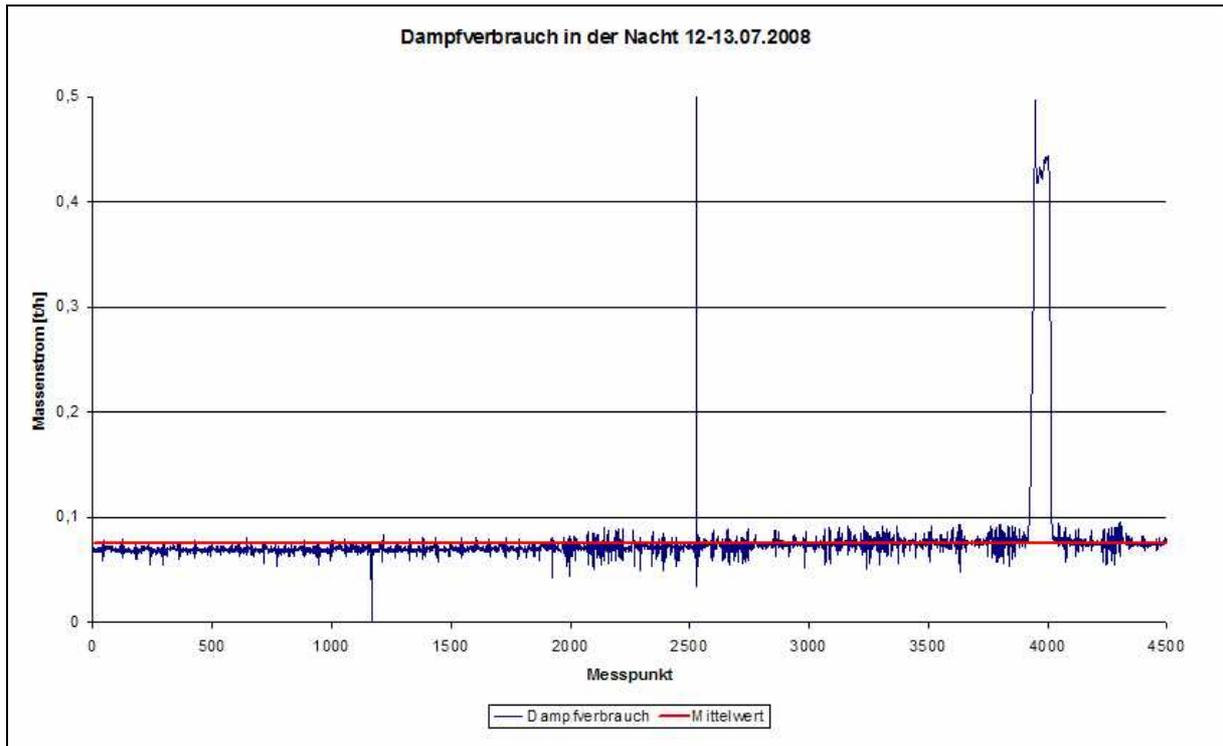


Bild 29 Dampfverbrauch in der Nacht (16:30 – 5:00 Uhr)

Der Mittelwert des Dampfmassenstromes beträgt in der Nacht 0,075 t/h (75 kg/h). Dies entspricht (nach Gleichung 5.2) 49 kW Wärmeleistung, die für die Beheizung des Speisewassers während der Nacht und zum Ausgleich der Brüdenverluste benötigt wird.

$$\dot{Q}_{S,B} = \dot{m} \cdot \Delta h = \frac{75 \text{ kg} \cdot \text{h}}{3.600 \text{ s} \cdot \text{h}} \cdot (2.785 - 417,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 49 \text{ kW}$$

Strahlungs- und Abgasverluste der Kessel sind hier noch nicht berücksichtigt, weil die Messung dampfseitig erfolgte. Die gemessene Menge entspricht der Wärmeabgabe der Kessel.

Die weitere Auswertung der Verbrauchsmessung erfolgt im Kapitel 4.4 im Anschluss an die Bedarfswertung der Anlage.

4 Energetische Bewertung

Die energetische Bewertung der Dampfversorgung kann nur indirekt erfolgen, da die zugeführte Gas- bzw. Heizölmenge nicht einzeln gezählt wird. Folgender Ansatz wird verfolgt:

1. Vollständige Bewertung des Nahwärmenetzes incl. der zugeführten Gas- und Ölmengen; die Differenz zum Gesamtverbrauch muss der Dampfanlage zugeführt worden sein
2. Die Erzeugerverluste der Dampfkessel werden abgeschätzt und die erzeugte Dampfmenge bestimmt; diese sollte vergleichbar mit dem Messwert aus der Dampfmesung sein
3. Die Netzverluste werden abgezogen und die zu den Verbrauchern gelieferte Dampfmenge bestimmt; diese sollte sich in etwa decken mit der aus Anschlussleistung und Laufzeit der Verbraucher bestimmten Menge.

Die Bewertung setzt also voraus, dass eine Aufteilung des Gesamtgasverbrauchs und Gesamtölverbrauchs auf die Bereiche "Nahwärme" und "Dampf" bereits erfolgt ist.

4.1 Erzeuger

Abgeschätzt werden alle Verluste, wie Strahlungsverluste der Kessel und Strahlungsverluste des Speisewasserbehälters, Abgasverluste sowie Verluste durch thermische Entgasung.

4.1.1 Zugeführte Energiemenge

Aus der vollständigen Bilanz der Nahwärme für das Projektjahr 2007/2008 ergibt sich der Anteil, der für die Dampferzeugung übrig bleibt, wie folgt:

- Gesamte zugeführte Menge: 11779 MWh/a (11667 MWh/a Gas und 112 MWh/a Öl)
- Nahwärmeanteil: 9113 MWh/a (siehe Endbericht 05 "Nahwärme")
- Dampfanteil: 2676 MWh/a (das sind 2651 MWh/a Gas und 25 MWh/a Öl)

Alle Werte sind auf den Brennwert bezogen, mit dem nachfolgend auch weitergerechnet wird.

4.1.2 Abgasverlust

Die erste zu bestimmende Größe in der rückwärts abgeschätzten Verlustkette, ist der Abgasverlust. Fragestellung ist: wie viel Energie geht in diesem Umwandlungsschritt verloren und welche Energiemenge steht thermisch nach der Umwandlung zur Verfügung.

Durch Immissionsmessungen wird ein feuerungstechnischer Wirkungsgrad η_F (heizwertbezogen) zwischen 91,3% bei Grundlaststellung und 90,1% bei Vollaststellung angegeben. Der Unterschied kommt durch höhere Abgastemperaturen unter Vollast zustande. Vereinfacht soll hier mit dem Mittelwert von 90,7% gerechnet werden. Das entspricht einem Abgasverlust von $100\% - 90,7\% = 9,3\%$.

Da dieser Wert auf den Heizwert bezogen ist, die Bilanz aber brennwertbezogen erstellt werden soll, muss er auf Brennwertbezug umgerechnet werden. Dies erfolgt mit unten aufgeführter Gleichung:

$$q_a(H_s) = 1 - \frac{[1 - q_a(H_i)]}{\left(\frac{H_s}{H_i}\right)} = 1 - \frac{[1 - 0,093]}{1,11} = 0,1828 \approx 18,3\%$$

Der Abgasverlust beträgt 18,3 %. Das bedeutet, dass der feuerungstechnische Wirkungsgrad (bezogen auf den Brennwert H_s) für die Dampferzeugung bei 81,7 % liegt.

$$q_a(H_i) = (1 - \eta_F(H_i)) = (100\% - 90,7\%) = 9,3\% \approx 0,093$$

$$\eta_F(H_s) = 1 - q_a(H_s) = 1 - 0,183 = 0,817 \approx 81,7\%$$

Teilbilanz

Von der gesamten zugeführten Energiemenge werden 81,7 % in Wärmeenergie umgewandelt, 18,3 % gehen als Abgasverlust verloren:

- Abgasverlust: 18,3 % · 2676 MWh/a = 490 MWh/a
- umgewandelte Energiemenge: 81,7 % · 2676 MWh/a = 2186 MWh/a

4.1.3 Strahlungs- und Bereitschaftsverlust

Die umgewandelte Menge wird nicht komplett als Dampf dem Netz zur Verfügung gestellt. Die Anlage weist Strahlungs- und Bereitschaftsverluste auf, welche bestimmt werden müssen, damit die tatsächlich produzierte Dampfenergiemenge berechnet werden kann.

Die beiden Kessel werden im Folgenden als eine Einheit angesehen und deren Verluste bestimmt.

Bereitschaftsverlustabschätzung: Nachbetrieb

Um die Bereitschafts- und Strahlungsverluste zu ermitteln, soll die Betriebszeit während der Nächte an beiden Kesseln ausgewertet werden. Die während dieses Zeitraumes abgenommene Dampfmenge dient nur zur Beheizung der Kessel, da in der Nacht auf Grund der geschlossenen Hauptleitung kein Kondensat anfällt. Daher kann die verbrauchte Gasmenge in der Nacht näherungsweise als Strahlungs- und Bereitschaftsverlust der Dampferzeuger – auch tagsüber – angesehen werden.

Es ist davon auszugehen, dass die Brenner während der "Standby-Phase" im Grundlastbereich gefahren werden. Hierzu liegen Gasverbrauchswerte vor (Brenner-Wartungsprotokolle). Diese entsprechen an Brenner I 38 m³/h und an Brenner II 35 m³/h. Mit Hilfe dieser Verbrauchswerte und der mittleren Bereitschaftszeit während der Nächte kann die verbrauchte Gasmenge errechnet werden. Erste Messungen ergeben eine mittlere Laufzeit von Brenner I von 1,31 Stunden und von Brenner II von 1,7 Stunden je Nacht.

Wird der Teillastvolumenstrom des Brenngases mit der nächtlichen Betriebszeit und dem Brennwert multipliziert, so erhält man für Brenner I 486,55 kWh und für Brenner II 581,55 kWh als nächtlichen Bereitschaftsverlust.

Da Druck und Temperatur der Dampfkessel konstant aufrechterhalten werden, kann anhand dieser Werte der Bereitschaftsverlust der Dampferzeugung ermittelt werden. Zu berücksichtigen ist der ständige Dampfverbrauch für die Kesselspeisewasseraufbereitung bzw. deren nächtliche Beheizung.

Die Haupt-Dampfversorgungsleitung wird zwischen 16:00 und 5:00 Uhr abgeschaltet. Demnach entspricht die auf die Bereitschaftszeit umgerechnete mittlere Leistung den Bereitschafts- und/oder Strahlungsverlusten der Dampferzeugung. Die mittleren Leistungen errechnen sich aus dem Quotienten der während der Nacht verbrauchten Energiemenge und der Bereitschaftszeit. Da an den Wochenenden (2 Tage je Woche) eine längere Betriebspause (19 Stunden) als unter der Woche (5 Tage je Woche, 13 h) seitens der Verbraucher eingehalten wird, errechnet sich die Bereitschaftszeit wie folgt:

$$z = z_1 + z_2 = \frac{5d}{7w} \cdot 13h + \frac{2d}{7w} \cdot 19h = 14,7h/d$$

Die mittlere Leistung der beiden Brenner (Energiezufuhr) bezogen auf die nächtliche Bereitschaftszeit beträgt jeweils:

$$\dot{Q}_{FI} = \frac{Q_{FI}}{z_I} = \frac{486,55kWh}{14,7h} = 33kW$$

$$\dot{Q}_{FII} = \frac{Q_{FII}}{z_{II}} = \frac{581,55kWh}{14,7h} = 40kW$$

Die Leistung beträgt zusammen 73 kW, enthält jedoch auch die Abgasverluste nachts. Unter Berücksichtigung des Abgasverlustes während der Brennerlaufzeiten ergibt sich für die Summe beider Brenner eine vereinfacht zusammengefasste Bereitschafts- und Strahlungsverlustwärmeleistung von insgesamt ca. 60 kW.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{S,BI/II} &= \dot{Q}_{FI/II} \cdot (1 - 0,183) \rightarrow \dot{Q}_{S,BI} = 33kW \cdot (1 - 0,183) = \underline{27kW} \\ \dot{Q}_{S,BII} &= \underline{33kW} \end{aligned}$$

Die Summe aus den Oberflächenverlusten der Kessel samt Verrohrung beträgt also nachts 60 kW. Diese Dauerleistung heizt das Kesselhaus und tritt in etwa gleicher Höhe auch tagsüber auf.

Auf eine Betriebszeit von 360 Tagen im Jahr hochgerechnet, errechnen sich die Bereitschafts- und Strahlungsverluste zu ca. 518 MWh/a.

$$Q_{V,S,B} = 360 \frac{d}{a} \cdot 24 \frac{h}{d} \cdot 60kW = 518,4 \frac{MWh}{a}$$

Eine grobe Aufteilung dieser Menge auf die Kessel selber und die restlichen Komponenten der Zentrale kann anhand der Dampfmengenmessung erfolgen. Hinter dem Kessel wird eine Dauerleistung von 49 kW nachts gemessen. Daraus kann man grob schätzen, dass die Kessel selbst einen Verlust von 11 kW haben.

Teilbilanz

Von der gesamten umgewandelten Energiemenge (2186 MWh/a) geht ein Teil als Strahlungs- und Bereitschaftsverlust verloren.

- Strahlungs- und Bereitschaftsverlust: 518 MWh/a
- restliche Energiemenge: 2186 MWh/a – 518 MWh/a = 1668 MWh/a

4.1.4 Verlust durch thermische Entgasung

Auch die zwischenbilanzierte Energiemenge verlässt noch nicht das Kesselhaus in Richtung Verbraucher. Es müssen betriebsbedingte Verluste, wie die Dampfmenge, die allein für die Entgasung des Speisewassers im Betrieb benötigt wird, noch abgezogen werden.

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, erfordert der Betrieb einer Dampfkesselanlage eine besondere Speisewasseraufbereitung. Die thermische Entgasung des Kondensats und des zugeetzten Permeats mittels Sprüh-Umlauf-Entgaser benötigt eine ständige Dampfversorgung.

Wie viel Dampf dafür benötigt wird, das Gemisch aufzubereiten, soll im Folgenden abgeschätzt werden.

Da das Kondensat auf Grund der voneinander unabhängigen Verbraucher nie mit einer konstanten Temperatur zurück in die Kondensataufbereitung fließt, ist hier ein sinnvoller Mittelwert anzunehmen. Es soll hier vereinfacht eine Kondensattemperatur von konstanten 70°C angenommen werden, da es mit einer Temperatur > 70°C aus dem Netz zurückgelangt und im Kondensatbehälter mit kaltem Permeat gemischt wird.

Dies bedeutet, dass das in den Speisewasserbehälter gepumpte Wasser von 70°C und Normaldruck auf ca. 0,2 bar Überdruck und eine Temperatur 105°C gebracht werden muss. Dieser Vorgang erfolgt mittels der Kondensatpumpen und anschließender Dampfzufuhr.

Vereinfacht soll als Enthalpie (Energieinhalt eines Stoffes oder Stoffstromes) des Wassers im Zustand vor dem Speisewasserbehälter näherungsweise die Enthalpie $h_1' = 289,3$ kJ/kg bei $t_s = 69,1^\circ\text{C}$ verwendet werden.

Im Endzustand des Wassers (nach dem Entgasen) liegt die Temperatur auf dem Niveau der Siedetemperatur des im Behälter vorhandenen Druckes (ca. 105°C). Die entsprechende spezifische Enthalpie des Wassers beträgt dann $h_2' = 439,3$ kJ/kg.

Die vorhandene Enthalpiedifferenz beträgt also 150 kJ/kg.

$$\Delta h = h_2' - h_1' = (439,3 - 289,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 150,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (0.1)$$

Der Kondensatmassenstrom (70°C) muss dem durch die Dampfkessel erzeugten Dampfmassenstrom entsprechen. Es soll hier der durch Dampfverbrauchsabschätzungen in Wäscherei und Küche ermittelte Wert von durchschnittlich 928 kg/h angesetzt werden (Dieser Wert stammt aus der Verbrauchsabschätzung von Nadine Sängler in der von ihr bearbeiteten Diplomarbeit).

Die Enthalpiedifferenz Δh entspricht einer durch den Heizdampf abgegebenen Wärmeleistung von 38,7 kW.

$$\dot{Q}_{\text{Kond}} = \dot{m}_{\text{Kond}} \cdot \Delta h = 928 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 150,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{\text{h}}{3600\text{s}} = \underline{38,7 \text{ kW}}$$

Diese Wärmeleistung muss dem ankommenden Kondensat über den Heizdampf zugeführt werden. Der notwendige Dampf wird direkt der Dampfhauptleitung mit 12 bar entnommen und über einen Dampfdruckregler auf einen Überdruck von 0,2 bar herunter geregelt. Die Druckregelung bewirkt eine Überhitzung des Dampfes hinter dem Regelventil. Es wird vereinfacht zu Grunde gelegt, dass die Verminderung des Druckes von 12 bar auf 1,2 bar ohne Wärmeverlust verläuft.

Für den Zustand des Dampfes bei 12 bar (abs.) ergibt das Dampfdruckdiagramm eine spezifische Enthalpie von $h_u = 2.850$ kJ/kg. Die zur Verfügung stehende Enthalpiedifferenz Δh beträgt demnach 2.410 kJ/kg.

$$\Delta h = h_u - h_2' = (2.850 - 439,3) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 2.410 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Der für die oben errechnete notwendige Wärmeleistung zum Ausgleich der Entgasungsverluste von 38,7 kW benötigte Dampfmassenstrom kann nun bestimmt werden.

$$\dot{Q}_{\text{kond}} = \dot{Q}_D \Rightarrow \dot{m}_D = \frac{\dot{Q}_D}{\Delta h} = \frac{38,7 \text{ kJ}}{2.410 \text{ kJ}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot \frac{3.600 \text{ s}}{\text{h}} = \underline{\underline{57,8 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}}$$

Bei einem von montags bis freitags durchschnittlich geforderten Dampfmassenstrom von ca. 928 kg/h muss diese Dampfmenge zusätzlich aufgebracht werden, um die Anlage in Betrieb zu halten. Die von den Kesseln abgegebene Dampfmenge entspricht dann also 984 kg/h. Der Speisewasserbehälter verbraucht davon ca. 6 %.

$$\frac{57,8 \text{ kg/h}}{(928 + 57,8) \text{ kg/h}} = 0,0586 \approx 6\%$$

Teilbilanz

Die jährliche Dampfmenge zur thermischen Entgasung entspricht ca. 6 % der erzeugten Dampfmenge. Daher kann die nächste Teilbilanz erstellt werden. Basis ist die im vorherigen Kapitel berechnete zur Verfügung stehende Dampfenergiemenge ab Erzeuger (1668 MWh/a).

- Energiemenge für thermische Entgasung: $0,06 \cdot 1668 \text{ MWh/a} = 100 \text{ MWh/a}$
- Dampfenergiemenge ab Kesselhaus: $1668 \text{ MWh/a} - 100 \text{ MWh/a} = 1568 \text{ MWh/a}$

Von der gesamten Energiemenge, welche die Erzeuger in Form von Dampf bereitstellen (1668 MWh/a) geht ein Teil in die Entgasung und der Rest (1568 MWh/a) verlässt das Kesselhaus. Eine kleine Ungenauigkeit ist enthalten. Die Verluste des Kondensatbehälters im Kesselhaus werden dem Verteilnetz zugeschlagen.

4.2 Netz

Das Netz weist bis zu den Verbrauchern Verluste der Leitungen (Dampf- und Kondensatleitungen) sowie der Behälter (Medien- und Wärmeverluste) auf.

4.2.1 Wärmeverluste am Rohrnetz

Im folgenden Abschnitt sollen die Leitungsverluste aller Leitungen untersucht werden. Über die Temperaturdifferenz vom Medium im Rohr über die Rohrwand nach außen lässt sich der Wärmeverlust durch Transmission am Rohr ermitteln.

Die Drücke in den Leitungen sind daher von großer Bedeutung, um die Temperatur des Mediums darin abzuschätzen. Da bei Dampf zu jedem Druck eine entsprechende Temperatur gehört, soll hier vereinfacht immer die Sattdampf Temperatur des herrschenden Druckes angenommen werden, um die Temperatur im Innern des Rohres abzuschätzen.

Die Druckstufen mit den zugehörigen Temperaturen sollen gemäß Sattdampf tabel wie folgt angenommen werden: Welche Leitungsabschnitte welchem Druckniveau zugeordnet sind, ist den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

p[bar]	t[°C]
12	188
8	175
5	150
0,3	107
./.(Atmosphäre)	100

Tabelle 4 Druck- bzw. Temperaturniveaus der Dampfverteilung,

Für die Erdleitungen liegen Datenblätter vor, in denen der mittlere U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) angegeben ist. Damit lässt sich dort der Wärmeverlust leicht ermitteln. Für die Gebäudeleitungen liegen keine Daten vor. Die Wärmeverluste müssen geschätzt werden. Dazu soll das Rohr mit seiner Wärmedämmung als dreischichtige Zylinderwand angenommen werden.

4.2.2 Erdleitungen

Bei der Dämmung der Erdleitungen handelt es sich um eine Verbunddämmung bestehend aus zwei Schichten. Zur Verwendung kommt ein vorisoliertes Rohrsystem. Im Inneren befindet sich eine erste Schicht aus Mineralwolle. Daran angrenzend und nach außen hin folgt PUR-Hartschaum, welcher mit einem PE-Mantel umhüllt ist, um den Innenraum gegen äußere Einflüsse und starke Gasdiffusion durch die Außenhaut zu schützen.

Die innen liegende Schicht aus Mineralwolle ist ca. 2 cm dick. Diese ist im Gegensatz zu der danach folgenden Schicht aus PUR-Hartschaum hochtemperaturfest. Durch den inneren Mantel aus Mineralwolle wird der äußere PUR-Mantel auch gegen durch Rohrdehnung entstehende Reibungskräfte geschützt.



Bild 30 Dampfhauptleitung im Bereich der Trasse zwischen Kesselhaus und Küche.

Kondensatleitungen sind in normalen Kunststoffmantelrohren ausgeführt. Die Längen und Druckniveaus sowie Durchmesser der Rohrstrrecken werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

	Dampfleitungen			Kondensatleitungen	
	Länge [m]	DN[mm]	pü[bar]	Länge [m]	DN[mm]
Hauptleitungstrasse Kesselhaus - Küche	96	100	12	96	65
Leitungstrasse Küche - Wäscherei	52	80	12	52	50

Tabelle 5 In der Erde verlegte Leitungen der Dampfverteilung

Zur Berechnung der Wärmeverluste soll eine mittlere Erdreichtemperatur von konstanten 8°C angenommen werden. Die Erdleitungen sind in einem Sandbett verlegt. Zur Aufnahme der Rohrdehnung sind Festpunkte in Form von Betonblöcken in den Erdkanal eingegossen worden und im Bereich vor dem Zentrallager befindet sich ein Dehnungsbogen zur Kompensation der Rohrdehnung in der Hauptleitung.

Nach Gesprächen mit dem zuständigen Planer, der für die Sanierung des Dampfnetzes im Jahr 2000/01 zuständig war und mit der Firma, die im Sommer 2008 mit den Reparaturarbeiten vor der Küche beschäftigt war, ist das damals verlegte Rohrsystem baugleich zu dem, das als neue Erdleitung zwischen dem Kesselhaus und der Küche verlegt werden soll.

In Bild 31 ist die ursprüngliche Dampfversorgungstrasse aus dem Jahr 1973 zu sehen, die 2000/01 erneuert wurde. Gut erkennbar ist der Unterschied des Dämmstandards zwischen den beiden Leitungen.



Bild 31 Ursprüngliche Hauptleitung (oben verlaufend) und neue Hauptleitung aus 2000/01 (unten verlaufend)

Der Hersteller gibt für die Kunststoffmantelrohre Gesamt-Wärmeverlustkoeffizienten je Meter Rohr an. Diese sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

DN	System	U_m
100	HT3 Wolle/PUR	0,327W/Km
80	HT3 Wolle/PUR	0,278W/Km
65	Vorisoliert PUR	0,222W/Km
50	Vorisoliert PUR	0,197W/Km

Tabelle 6 Herstellerangaben über Wärmeverlustkoeffizienten der Erdleitungen

Aus dem Abschlussbericht des neunten Dresdner Fernwärmekolloquiums mit der Thematik "Alterung von Kunststoffmantelrohr – Praxisergebnisse" geht hervor, dass sich die Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials PUR-Hartschaum um ca. 20% zum Ausgangszustand erhöht. Die Studie soll nicht weiter erläutert werden. Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffmantelrohr wird jedoch deutlich, dass die Dämmeigenschaften des Materials bei Alterung schlechter werden. Für die Berechnung der Leitungsverluste sollen die Herstellerwerte vereinfacht als 20% größer angenommen werden.

Der Verlustwärmestrom dieser Leitungen lässt sich mit der üblichen Wärmeverlustgleichung berechnen.

$$q_v = U \cdot (t_i - t_a) \left[\frac{W}{m} \right] \rightarrow \dot{Q}_v = q_v \cdot l [W]$$

Es ergibt sich daraus für die Erdleitungen aus Tabelle 5 ein Verlustwärmestrom von insgesamt 13.386 W

Dampfleitungen:

$$Q_{V, DN100} = 0,327 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 1,2 \cdot (188 - 8)K = \underline{70,632} \frac{W}{m}$$

$$\dot{Q}_V = l \cdot q_V = 96m \cdot 70,632 \frac{W}{m} = \underline{\underline{6.780W}}$$

$$Q_{V, DN80} = 0,278 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 1,2 \cdot (188 - 8)K = \underline{60,05} \frac{W}{m}$$

$$\dot{Q}_V = l \cdot q_V = 52m \cdot 60,05 \frac{W}{m} = \underline{\underline{3.123W}}$$

Kondensatleitungen:

$$Q_{V, DN65} = 0,222 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 1,2 \cdot (100 - 8)K = \underline{24,5} \frac{W}{m}$$

$$\dot{Q}_V = l \cdot q_V = 96m \cdot 24,5 \frac{W}{m} = \underline{\underline{2.352W}}$$

$$Q_{V, DN50} = 0,197 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 1,2 \cdot (100 - 8)K = \underline{21,75} \frac{W}{m}$$

$$\dot{Q}_V = l \cdot q_V = 52m \cdot 21,75 \frac{W}{m} = \underline{\underline{1.131W}}$$

4.2.3 Gebäudeleitungen

Die Wärmedämmung der in den Gebäuden installierten Leitungen ist durch Mineralwolle realisiert. Zum Schutz gegen äußere Einflüsse ist an alten Leitungstrassen ein ca. 3-5 mm dicker Gipsmantel aufgebracht worden. Neuere oder bereits sanierte Abschnitte sind von außen mit einer dünnen PE-Beschichtung überzogen.



Bild 32 Zustand der Gebäude-Hauptzuleitung in der Küche (alter Rohrabschnitt).



Bild 33 Zustand einiger wärmegeämmter Leitungen im Wäschereikeller

In den Abbildungen ist zu erkennen, in welchem Zustand sich die Dämmung der Gebäudeleitungen teilweise befindet. Es sind teilweise durch Reparaturarbeiten alte, aber intakte Dämmungen beschädigt worden, anschließend aber nicht erneuert worden. Eine erneuerte Niederdruckzuleitung ist in Bild 34 zu sehen.



Bild 34 Neu verlegte Niederdruckdampfleitung unter Küche

Für die Dampfleitungen, die in den Kellern verlegt worden sind, ergeben sich unter der Annahme einer dreischichtigen Rohrwand die Verlustwärmeströme nach nachfolgender Gleichung:

$$\dot{Q}_V = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_1 - t_4)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}} \quad (0.2)$$

t = Temperatur [°C]

l = Länge der Rohrleitung [m]

r = Radius der entspr. Schicht [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit der entspr. Schicht [W/mK]

Normalerweise müsste bei der dreischichtigen Wand an dieser Stelle noch der Wärmeübergang an die Raumluft mit dessen Wärmeübergangskoeffizient berücksichtigt werden. Der äußere Wärmeübergangswiderstand wird vereinfacht vernachlässigt.

Die Medientemperaturen der Rohre sind tabelliert. Rohre im unbeheizten Bereich sollen gegen 15°C Raumtemperatur gerechnet werden. Die Schichtdicken, wie Dämmstärke und Ummantelung sind geschätzt. Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien sollen wie folgt angenommen werden:

Schicht	Wärmeleitfähigkeit λ
Rohrwand/Behälterwand (Stahl)	52W/(mK)
Wärmedämmung (Mineralwolle)100°C	0,053W/(mK)
Wärmedämmung (Mineralwolle)150°C	0,06W/(mK)
Wärmedämmung (Mineralwolle)200°C	0,067W/(mK)
Mantel (PE/Gips)	0,4W/(mK)

Tabelle 7 Annahmen für Wärmeleitfähigkeiten

Diese Art der Berechnung wird für alle Rohrabschnitte durchgeführt. Dabei wird zwischen Küchenleitungen und Wäschereileitungen unterschieden. Die Berechnung ist einer Tabellenkalkulation des Anhangs zu entnehmen.

Für die Wäscherei sind folgende Abschnitte zu berechnen:

	Dampfleitungen			Kondensatleitungen	
	Länge [m]	DN[mm]	pü[bar]	Länge [m]	DN[mm]
Hauptleitung zum Verteiler	23	80	12		
Hauptkondensatleitungen				26	80
				30	50
Waschmaschine/ Trockner/ Mangel	6	65	12		
	21	40	5		
rechter Durchbruch, links	29	40	12	16	25
rechter Durchbruch, rechts	12,5	40	12	12,5	25
Presse 1	14,5	40	8		
	4,5	15	8	4,5	15
Presse 2	17	10	8		
	2,5	15	8	2,5	15

Tabelle 8 Leitungsabschnitte in der Wäscherei

Die Berechnung ergibt für die Wäscherei einen Gesamt-Wärmeverlust von rund 13,8 kW. Auf Grund der Tatsache, dass einige Rohrabschnitte bzw. Schieber und Regelorgane gar nicht oder schadhaft gedämmt sind (Fotos im Anhang), scheint ein Zuschlag von 5% angemessen. Der Wärmeverlust beträgt dann 14,5 kW.

Für die Leitungsabschnitte in der Küche ist die Vorgehensweise analog. Es werden berechnet:

	Dampfleitungen			Kondensatleitungen	
	Länge [m]	DN[mm]	pü[bar]	Länge [m]	DN[mm]
Gebäudehauptleitungen – Küche					
Hauptzuleitung	10	65	12	12	50
Hauptzuleitung / Kochen	3	65	6	./.	./.
Hauptzuleitung / Waschstr.	6	50	6	./.	./.
Kochen	24	100	0,3	19	50
Waschstraße	15	50	0,3	21	25

Unterverteilung – Küche					
1)	6	25	0,3	11	20
2)	2x1	25	0,3	13	20
3)	5	25	0,3	8,5	20
				9	20
4)	3	25	0,3	10,5	25
5)	1	25	0,3	8	20
				9	20
6)	1	40	0,3	7,5	25
	3	25	0,3	9	25
7/1)	3	40	0,3		
	1	25	0,3		
7/2)	1	40	0,3		
8)	2	20	0,3	6	20
	2,5	25	0,3	5,5	20

Tabelle 9 Leitungsabschnitte in der Küche

Die Gesamt-Verlustwärmeleistung beträgt dort 6,9 kW unter Berücksichtigung des 5%-Aufschlags für schadhafte Wärmedämmungen.

4.2.4 Wärme- und Medienverluste an Kondensatbehältern

An den Kondensatbehältern treten nicht nur Wärme-, sondern auch Medienverluste durch Verdampfung auf der Oberfläche des sich im Behälter befindenden Kondensats auf. Beides soll im folgenden Kapitel behandelt werden.

Der Medienverlust durch Brügendampf an den Kondensatbehältern ist sehr gering. Auf Nachfrage bei einer erfahrenen Fachfirma beträgt der Brüdenanteil ca. 0,3 ... 0,5 % des Gesamtmassenstromes an Dampf. Hinzu kommt der Brüdenverlust bei der thermischen Entgasung von ca. 0,5 ... 2,0 % des Gesamtmassenstroms an Dampf. Es soll daher vereinfacht angenommen werden, dass insgesamt ca. 2 % des Gesamt-Dampfmassenstromes als Brügendampf verloren gehen.

Dies ergibt einen Massenstrom von ca. 20 kg/h bei einem den Verbrauchern zugeführten Dampfmassenstrom von ca. 1.000 kg/h in der Anlage. Bei 10,5 Stunden Betriebszeit wochentags ergibt dies insgesamt 210 kg Brügendampf. An Wochenenden liegt der Verlust durch Brügendampf bei 2 kg täglich (100 kg/h Dampfmassenstrom).

Über das Jahr gesehen kommt ein Medienverlust von 55,8 m³/a zustande.

$$\dot{m}_{Br,a} = \dot{m}_{Br,Tag,a} + \dot{m}_{Br,WE,a}$$

$$\dot{m}_{Br,a} = 20 \frac{kg}{h} \cdot 10,5 \frac{h}{d} \cdot \frac{5}{7} \cdot 365 \frac{d}{a} + 2 \frac{kg}{h} \cdot 5 \frac{h}{d} \cdot \frac{2}{7} \cdot 365 \frac{d}{a} = \underline{\underline{55.793 \frac{kg}{a}}}$$

Diese Menge ist gering und daher für den Wärmeverlust weniger interessant, als für die Wasserkosten. Wichtiger sind Wärmeverluste über die Oberflächen der Kondensatbehälter Fotos siehe Kapitel 2.2.4.

Die Verluste sollen vereinfacht unter der Annahme einer dreischichtigen Wand bestimmt werden. Innen liegt eine Behälterwand aus Stahl, dann folgt eine Wärmedämmung (WLG 040, 6 cm) und außen wiederum eine Hülle aus verzinktem Stahlblech. Die Oberfläche ergibt sich für die quaderförmig gebauten Behälter mit den Maßen 1,46 m x 1,0 m x 0,75 m zu insgesamt 6,61 m².

Je Behälter ergibt sich dann eine Verlustwärmeleistung von ca. 352 W, was bei zwei Behältern (je einer in Küche und Wäscherei) insgesamt eine Verlustwärmeleistung von 704 W ausmacht.

$$\dot{Q}_v = \frac{1}{\frac{0,004m^2 \cdot K}{52W} + \frac{0,06m^2 \cdot K}{0,040W} + \frac{0,001m^2 \cdot K}{52W}} \cdot 6,61m^2 \cdot (100 - 20); \dot{Q}_v = \underline{352W}$$

Für den Kondensatbehälter im Kesselhaus ergibt sich ein höherer Wärmeverlust, da dieser nicht wärmegeklämt ist. Durch die Vermischung des Kondensats mit Permeat verringert sich die Temperatur des Mediums im Behälter auf durchschnittlich ca. 70°C.

Die Verlustwärmeleistung an diesem Behälter wird mit o. g. Formel berechnet, jedoch ohne die Schichten Wärmedämmung und Blechverkleidung. Daher wird ein höherer Wärmeverlust von 2.500 W geschätzt. Der Behälter gibt ständig Wärme an das Kesselhaus ab. Das hohe Temperaturniveau ist im Bild 35 deutlich zu erkennen.

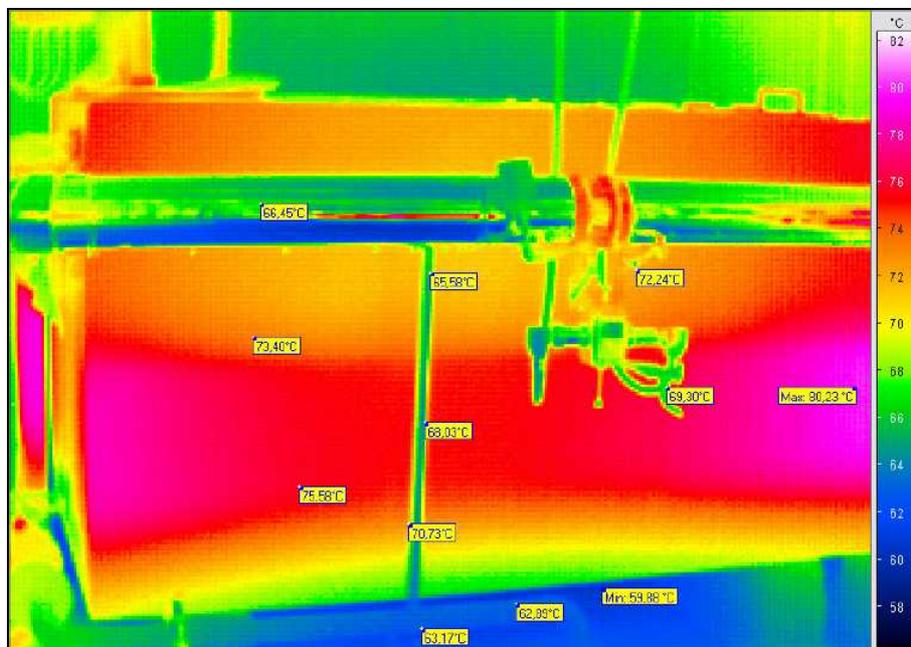


Bild 35 Temperaturniveau des nicht wärmegeklämteten Kondensatbehälters im Kesselhaus

4.2.5 Jahres-Verlustwärmemenge der Verteilung

Um die Jahres-Verlustwärmemenge zu bestimmen, sind die Betriebszeiten der Leitungsschnitte in der Küche sowie in der Wäscherei zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die Kondensatbehälter, welche in Küche und Wäscherei positioniert sind. Die Verluste in der Verteilung werden nur für die Teile der Anlage berücksichtigt, die zum Betrachtungszeitraum in Betrieb sind. An den Wochenenden ist nur die Küche in Betrieb, dies sind dann hauptsächlich die Niederdruck-Dampfleitungen sowie die Erdleitungen und die Kondensatbehälter in der Küche und im Kesselhaus.

Im Betrieb unter der Woche kommen die Leitungen sowie der Kondensatbehälter im Wäschereikeller hinzu.

Zunächst soll die Jahres-Verlustwärmemenge im Tagbetrieb unter der Woche berechnet werden. Diese setzt sich aus den Verlusten der Erdleitung sowie aller Gebäudeleitungen und den Kondensatbehältern zusammen. Die Betriebszeit beträgt 10,5h am Tag.

$$Q_{V,D,Tag} = \sum \dot{Q}_{V,D} \cdot z = \dot{Q}_{V,D,Erde+Kond} + \dot{Q}_{V,D,Kü+Kond} + \dot{Q}_{V,D,Wä+Kond}$$

$$\left| \begin{aligned} \dot{Q}_{V,D,Erde+Kond} &= \dot{Q}_{V,D,Erde} + \dot{Q}_{V,Kondensatbehälter} = 13,4kW + 2,5kW = 15,9kW \\ \dot{Q}_{V,D,Kü+Kond} &= \dot{Q}_{V,D,Küche} + \dot{Q}_{V,Kondensatbehälter} = 6,9kW + 0,35kW = 7,25kW \\ \dot{Q}_{V,D,Wä+Kond} &= \dot{Q}_{V,D,Wäscherei} + \dot{Q}_{V,Kondensatbehälter} = 14,5kW + 0,3kW = 14,8kW \end{aligned} \right.$$

$$Q_{V,D,Tag} = 38kW \cdot 365 \frac{d}{a} \cdot 10,5 \frac{h}{d} \cdot \frac{5}{7} = 104.025 \frac{kWh}{a} \approx \underline{\underline{104 \frac{MWh}{a}}}$$

Für den Wochenendbetrieb ergibt sich die Verlustwärmemenge nach derselben Gleichung, jedoch ohne die Wäschereileitungen.

$$Q_{V,D,WE} = \sum \dot{Q}_{V,D} \cdot z = \dot{Q}_{V,D,Erde+Kond} + \dot{Q}_{V,D,Kü+Kond}$$

$$\left| \begin{aligned} \dot{Q}_{V,D,Erde+Kond} &= \dot{Q}_{V,D,Erde} + \dot{Q}_{V,Kondensatbehälter} = 13,4kW + 2,5kW = 15,9kW \\ \dot{Q}_{V,D,Kü+Kond} &= \dot{Q}_{V,D,Küche} + \dot{Q}_{V,Kondensatbehälter} = 6,9kW + 0,35kW = 7,25kW \end{aligned} \right.$$

$$Q_{V,D,WE} = 23,2kW \cdot 365 \frac{d}{a} \cdot 5 \frac{h}{d} \cdot \frac{2}{7} = 12.097 \frac{kWh}{a} \approx \underline{\underline{12 \frac{MWh}{a}}}$$

Die auf das Jahr bezogene Verlustwärmemenge ergibt sich aus der Summe der Verluste des Wochenbetriebs und des Wochenendbetriebs und beträgt 116 MWh/a.

Teilbilanz

Das Kesselhaus verlassen 1568 MWh/a in Form von Dampf. Wegen der Netz- und Behälterverluste kann nun ausgerechnet werden, welche Energiemenge tatsächlich an den Verbrauchern ankommt:

- Energiemenge für Verteil- und Behälterverluste: 116 MWh/a
- Dampfenergiemenge für Verbraucher 1568 – 116 MWh/a = 1452 MWh/a

Eine kleine Ungenauigkeit ist enthalten. Die Verluste des Kondensatbehälters im Kesselhaus wurden dem Verteilnetz zugeschlagen.

4.3 Gesamtbilanz und Nutzungsgrad

Aus den Teilbilanzen der aller Einzelverlustbewertungen kann eine Gesamtbilanz erstellt werden. Das Bild zeigt zudem alle relevanten Nutzungsgrade.

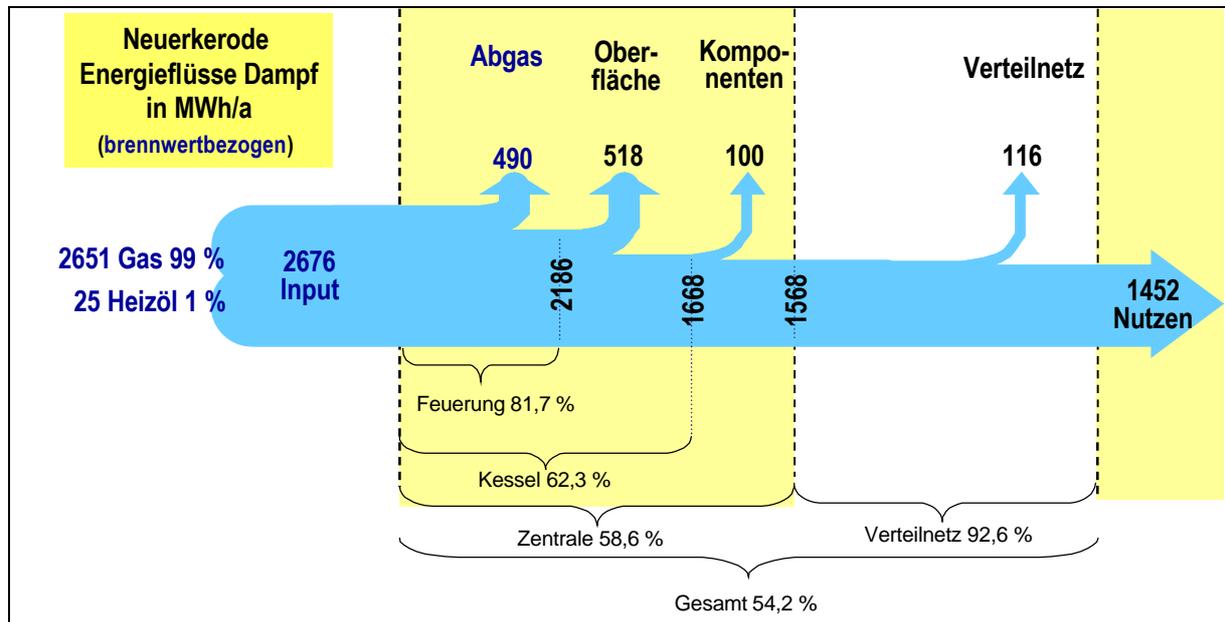


Bild 36 Gesamtbilanz Dampf

4.4 Überprüfung der Rechenwerte anhand der Dampfmessung

Die Gesamtbilanz soll in einem ersten Schritt mit dem Messwert der Dampfmengenmessung (Kapitel 3) überprüft werden. Bild 37 zeigt den mittleren Dampfmassenstrom an der Messstelle im Wochengang. Die Auswertung ergibt sich durch Mittelung der Messwerte innerhalb des Zeitraums.

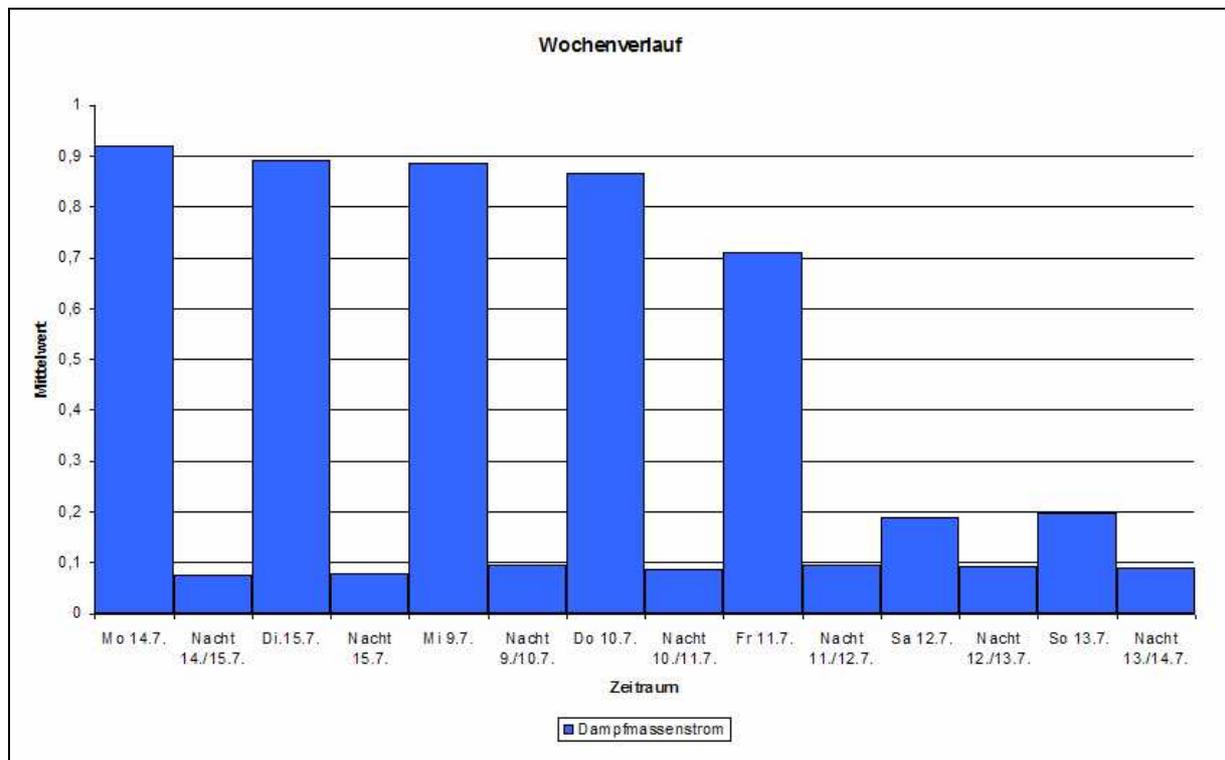


Bild 37 Wochenverlauf des Dampfmassenstromes von Montag bis Freitag 5:00-15:30 Uhr, samstags und sonntags von 6:00-13:00 (in t/h)

Als Grundlage für die Berechnung der Kenndaten soll der über die gesamte Woche gemittelte Dampfmassenstrom dienen. Die Wärmemenge (aus dem gemessenen Dampfmassenstrom) ergibt sich mit nachfolgender Gleichung.

Der Massenstrom beträgt nach der Mittelwertbildung über die Woche ca. 0,37 t/h. Das entspricht einer jährlichen Energiemenge von 2.132 MWh/a. Temperaturannahmen für den Dampf an der Messstelle 188°C bei 12 bar und 100°C bei 1 bar.

$$Q = \dot{m}_D \cdot (h''_{188^\circ\text{C}} - h'_{100^\circ\text{C}}) \cdot z = \frac{370 \text{ kg} \cdot (2.785 - 417,5) \text{ kJ}}{3.600 \text{ s} \cdot \text{kg}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot \frac{\text{MWh}}{1.000 \text{ kWh}} = 2.132 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

Einen exakten rechnerischen Vergleichswert für diesen Messwert gibt es nicht. Es gibt einen rechnerischen Kennwert, der keine Bereitschafts- und Strahlungsverluste enthält (2186 MWh/a) und einen Kennwert, der alle Bereitschafts- und Strahlungsverluste enthält (1668 MWh/a).

Die Messung enthält jedoch nur einen Teil der Bereitschafts- und Strahlungsverluste (Kesselanteil), weil sie hinter dem Kessel, aber vor dem Abgang zu den Behältern angeordnet ist. Insofern ist die Messung von 2132 MWh/a sehr plausibel, weil der Kennwert ebenfalls zwischen den beiden Rechenwerten liegt.

Die theoretische Bilanz wird durch die Messung gut wiedergegeben. Ein Fehler von 10 % mag vorhanden sein.

Überprüfung der Bilanz mit der Liste der Dampfverbraucher

Die Auflistung aller Dampfverbraucher aus Küche und Wäscherei liefert ebenso eine Nutzdampfmenge, jedoch als Dampfmassenstrom, vgl. Kapitel 2.4.3. Dieser beträgt über das Jahr gemittelt 320 t/h.

Der Dampfmassenstrom muss in eine Energiemenge umgerechnet werden. Der größte Anteil der Verbraucher befindet sich in der Wäscherei. Dort wiederum überwiegt 8 bar als Betriebsdruck. Daher werden die folgenden Temperaturen zur Umrechnung angesetzt: 170°C bei 8 bar und 100°C bei 1 bar.

Es ergibt sich aus der Liste der Verbraucher eine Energiemenge von:

$$Q = \dot{m}_D \cdot (h''_{170^\circ\text{C}} - h'_{100^\circ\text{C}}) \cdot z = \frac{320 \text{ kg} \cdot (2.516 - 417,5) \text{ kJ}}{3600 \text{ s} \cdot \text{kg}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot \frac{\text{MWh}}{1000 \text{ kWh}} = 1.634 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$$

Die Dampfmenge, welche die Summe aller Verbraucher laut Typenschildern und Betriebszeiten braucht, liegt sehr nahe an der Nutzdampfmenge nach Bilanz (1452 MWh/a). Der Fehler liegt hier bei etwa 12 %.

Die Annahmen der Dampfbilanz bestätigen sich insgesamt als schlüssig.

5 Dampfkosten

Im Rahmen der vorliegenden Auswertung wird nicht nur der energetische Dampfpreis (siehe Bericht 02 "Mediengrunddaten"), sondern ein Vollkostenpreis bestimmt. Die Kosten für eine Kilowattstunde Dampf setzen sich daher aus den folgenden Kostenstellen zusammen:

- Brennstoffkosten
- Hilfsenergiekosten
- Hilfsstoffkosten
- Wartungs- und Reparaturkosten
- Gehälter für Kesselwärter

5.1 Brennstoffkosten

Als Brennstoff wird zu ca. 99 % Erdgas verwendet. Nur ca. 1 % des gesamten Brennstoffaufwandes entsteht durch Heizöl. Dies kommt zustande, da die Stiftung Neuerkerode ein Abschaltkunde ist. Der Umschaltvorgang funktioniert automatisch und wird per Knopfdruck vom Energieversorger durchgeführt; dieser wird regelmäßig getestet. Das passiert an jedem ersten Mittwoch im Monat, an diesen Tagen wird der Betrieb aller Feuerstätten im Kesselhaus zwischen 9⁰⁰ und 10⁰⁰ Uhr auf Heizölbetrieb umgestellt. Im Jahr kommen daher ca. 45 Stunden Heizölbetrieb je Brenner zusammen.

Es ergeben sich folgende Kosten:

- Gas (brennwertbezogen): $2651 \text{ MWh/a} \cdot 53 \text{ €/MWh} = 140.503 \text{ €/a}$
- Heizöl (brennwertbezogen): $25 \text{ MWh/a} \cdot 82 \text{ €/MWh} = 2050 \text{ €/a}$
- Summe: 142.553 €/a

5.2 Hilfsenergiekosten

Mit Hilfsenergiekosten sind die Kosten gemeint, die durch den Betrieb von Hilfsaggregaten zustande kommen. Hilfsaggregate sind z.B. die Brennermotoren, Pumpenmotoren und andere elektrische Geräte, die zum Betrieb der Dampfanlage notwendig sind.

Die wichtigsten Aggregate sind die Brennermotoren. Anhand der Laufzeit der Brenner können mit der Motorleistung die jährlich verbrauchten Kilowattstunden an Strom ermittelt werden.

Die Betriebsstundenzahlen der Brenner sind aus den Schichtkontroll-Unterlagen entnommen. Aus den Jahren 2006 und 2007 ergeben sich für den Brenner I 2.898 Betriebsstunden und für Brenner II 2.883 Betriebsstunden.

- El. Energiemenge Brenner I: $2,2 \text{ kW} \cdot 2898 \text{ h/a} = 6,4 \text{ MWh/a}$
- El. Energiemenge Brenner II: $2,2 \text{ kW} \cdot 2883 \text{ h/a} = 6,3 \text{ MWh/a}$

Die Speisewasserpumpen sind an den Kesseln installiert und werden durch die stetige Füllstandsregelung angesteuert, sie laufen also nicht ständig. Laut Betriebsstundenzählung ergeben sich im Jahr 2.618 Betriebsstunden für Pumpe I und 1.430h/a für Pumpe II.

- El. Energiemenge Pumpe I: $5,5 \text{ kW} \cdot 2618 \text{ h/a} = 14,4 \text{ MWh/a}$
- El. Energiemenge Pumpe II: $5,5 \text{ kW} \cdot 1430 \text{ h/a} = 7,9 \text{ MWh/a}$

Für die Entgasungspumpe am Speisewasserbehälter kann ein dauerhafter Betrieb angenommen werden. Der Pumpenmotor hat eine Leistung von 750 W. Bei 8.760 Betriebsstunden im Jahr ergibt sich eine Energiemenge von:

- El. Energiemenge Entgasungspumpe: $0,75 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/a} = 6,6 \text{ MWh/a}$

Für die Pumpen am Kondensatbehälter im Kesselhaus ergibt sich laut Betriebsstundenzählung eine Gesamt-Betriebsstundenanzahl von 1.068,6 h/a. Dies bedeutet, dass die Laufzeit annähernd jener der Speisewasserpumpen entsprechen muss.

- El. Energiemenge Kondensatpumpe Kesselhaus: $0,75 \text{ kW} \cdot 1069 \text{ h/a} = 0,8 \text{ MWh/a}$

Um die Saughöhe der Speisepumpen I und II zu gewährleisten, ist eine sog. Boosterpumpe installiert, die zwischen Speisewasserbehälter und Speisepumpen montiert ist. Die Motorleistung beträgt 1,1 kW. Auf Grund der Einbaulage kann das Typenschild nicht abgelesen werden. Die Betriebsstunden werden auf Grund der Funktion der Pumpe mit der Laufzeit der Speisepumpe II gleichgesetzt (Speisepumpe II, da Betriebszeit größer als bei Speisepumpe I). Eine genauere Abschätzung kann nicht erfolgen, da der Betriebsstundenzähler zwar vorhanden, jedoch nicht angeschlossen ist.

- El. Energiemenge Boosterpumpe: $1,1 \text{ kW} \cdot 1573 \text{ h/a} = 1,7 \text{ MWh/a}$

Betriebsstunden werden für die Pumpen außerhalb des Kesselhauses nicht erfasst. Hierbei handelt es sich um die Kondensatpumpe in der Küche sowie in der Wäscherei. Die Abschätzung der Betriebsstunden dieser Pumpen könnte anhand des anfallenden Kondensats erfolgen. Die abgenommene Dampfmenge ergibt eine abgeführte Kondensatmenge, anhand der man mit bekanntem Förderstrom der Pumpe die Betriebslaufzeit ermitteln könnte. Da keine technischen Unterlagen vorhanden sind, muss die Betriebszeit abgeschätzt werden. Für die Kondensatpumpe in der Wäscherei soll eine tägliche Laufzeit von 2,5 Stunden (nur Mo-Fr) angenommen werden. Für die in der Küche installierte Pumpe soll eine Laufzeit von täglich einer halben Stunde angenommen werden, was zu 182,5 Betriebsstunden im Jahr führt:

- El. Energiemenge Kondensatpumpe Wäscherei: $2,2 \text{ kW} \cdot 1440 \text{ h/a} = 3,2 \text{ MWh/a}$
- El. Energiemenge Kondensatpumpe Küche: $0,55 \text{ kW} \cdot 912 \text{ h/a} = 0,5 \text{ MWh/a}$

Die Umkehr-Osmose-Anlage sowie die Enthärtungsanlage und die dafür nötigen Zusatzaggregate sind nicht am Betriebsstundenzähler angeschlossen, sodass hierfür keine Aussage gemacht werden kann.

Der Strompreis der Stiftung liegt bei 140 €/MWh. In der Summe ergeben sich bei einem Stromverbrauch von insgesamt 37,8 MWh/a Hilfsenergiekosten in Höhe von:

- Strom: $37,8 \text{ MWh/a} \cdot 140 \text{ €/MWh} = 5292 \text{ €/a}$

5.3 Hilfsstoffkosten

Hilfsstoffkosten sind Kosten, die z.B. für Rohwasser, Dosiermittel oder Probenentnahmesets anfallen. Die Rohwassermenge, die für den Betrieb der Anlage verbraucht wird, wird zu Beginn und zum Ende jeder Schicht erfasst. Da nur der Gesamt-Wasserverbrauch gemessen wird, müssen die Wasserkosten anteilig, wie bei den Gaskosten, der Dampferzeugung zugerechnet werden.

In Kapitel 4.2.4 wurde der Medienverlust über Brügendampf abgeschätzt. Er beträgt 55,8 m³/a. Die dafür verbrauchte Menge an Rohwasser kann über das Permeat-Konzentrat-Verhältnis in der Umkehr-Osmose-Anlage abgeschätzt werden.

So ergeben sich aus 55,8 m³/a Permeatzugabe ca. 75 m³/a Rohwasserzugabe (bei einem Permeat-Konzentrat-Verhältnis dieses Gerätes von 2:1).

Wegen eventueller Undichtheiten bzw. Medienverluste im Netz soll insgesamt mit 100 m³/a gerechnet werden. Der Preis je m³ Wasser beträgt 1,50 €/m³, Abwasserkosten fallen ebenfalls an 3,07 €/m³. Die dabei entstehenden Kosten betragen:

- $100 \text{ m}^3 \cdot (1,50 + 3,07) \text{ €/m}^3 = 457 \text{ €/a}$.

Als Dosiermittel wird für das Kesselspeisewasser ein Zusatzpräparat des Herstellers Dipolique verwendet. Der Name lautet Dipolique 449. Hinzu kommen Eisentests, Natriumsulfit-Nachweisbestecke, POC-Nachfüllpackungen. Die Eisen- und Natriumsulfittests dienen zur Wasseranalyse. POC bedeutet Polyacrylsäure und dient der Inbetrieb-Reinigung der Kesseloberfläche von Kesselstein. Für diese Stoffe wurden in den letzten 3 Jahren zusammen 1.282 € aufgewendet.

Dieser Betrag setzt sich aus den in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Rechnungen zusammen. Die mittleren Aufwendungen für Hilfsstoffe betragen daher 427 €/a.

Datum	Produkt/Menge	Kosten[€]
12.05.2005	POC-Nachfüllpack/ 1Set	68,67
20.07.2005	Dipolique 449/35kg	207,47
25.11.2005	POC-Nachfüllpack/ 4Set	253,81
28.03.2006	Dipolique 449/35kg	207,47
31.05.2006	Nachweisset/2 Stück Eisentest/1 Stück	250,68
26.01.2007	Dipolique 449/35kg	301,55
Summe:		1.282,03

Tabelle 10 Rechnungen über Chemikalien, der letzten 3 Jahre

Die Hilfsstoffkosten betragen zusammen 884 €/a.

5.4 Wartungs- und Reparaturkosten

Die Wartungs- und Reparaturkosten sind Kosten für Schornsteinfeger oder Werkskundendienst, für die Brennerwartung oder für die Wartung bzw. Reparatur anderer Teile. Um einen repräsentativen Mittelwert für die Wartungs- und Reparaturkosten pro Jahr zu erhalten sind alle Rechnungen bezüglich der Dampftechnik zwischen 2005 und 2007 ausgewertet worden.

Schornsteinfegergebühren sind in unten stehender Liste aufgeführt. Der Endbetrag der Rechnung kann jeweils nur mit ¼ des Betrages der Dampferzeugung zugerechnet werden, da beide Dampfkessel nur an einem Schornstein von insgesamt vier zu kehrenden Schornsteinen angeschlossen sind.

Datum	Tätigkeit	Kosten [€]
03.01.2005	Kehrgebühren Schornsteinfeger	124,80
02.01.2006	Kehrgebühren Schornsteinfeger	127,44
21.12.2007	Begehungsgebühr; Kehrgebühr Schornsteinfeger	250,74
Summe:		502,98

Tabelle 11 Kosten für Schornsteinfeger-Dienstleistungen der letzten 3 Jahre

Bei den Schornsteinfegergebühren ist im Jahr 2006 die Gebührenverordnung geändert worden, dies bedeutet, dass die Rechnung aus 2007 dem aktuellen Preis entspricht.

Die der Dampferzeugung anrechenbaren Kosten schlagen wegen des gemeinsamen Kamins mit 25% des Betrages aus der Rechnung von 2007 zu Buche; dies entspricht 63 €/a.

Bei den Wartungs- und Reparaturkosten sind drei Rechnungen enthalten, deren Endbetrag nicht vollständig der Dampferzeugung zuzurechnen ist.

Die erste Rechnung ist die Tankwartung vom 13.04.2007. Die zweite Rechnung ist die TÜV-Prüfung der Öltanks vom 09.05.2005. Hier wurde der Anteil für die Dampferzeugung entsprechend dem Verhältnis der Energieverbräuche zwischen Heizung und Dampf aufgeteilt.

Bei der dritten Rechnung handelt es sich um eine Rechnung vom TÜV für die Emissionsmessung über 4.139 €, welche anteilig zu 2/5 (Verhältnis der Kessel; Dampf/Heißwasser) der Dampferzeugung zugerechnet wird. Der Mittelwert der jährlichen Wartungs- und Reparaturkosten beträgt 7.007 €/a.

Eine Schwachstelle bei Wartungs- und Reparaturarbeiten sind die Speisepumpen der Dampfkessel. Diese Seitenkanalpumpen sind ständig Speisewasser mit über 100°C Temperatur ausgesetzt und dienen dazu das Speisewasser mit dem 1,25 bis 1,3-fachen des Anlagendruckes (ca.16 bar) in die Kessel zu pumpen. Diese müssen daher oft repariert bzw. ausgetauscht werden. Kleine Reparaturen und Störmeldungen können von den Kesselwärtern behoben werden.

5.5 Lohnkosten

Die Technischen Regeln für Dampfkessel fordern einen Kesselwärter, wenn die Anlage nach TRD 604 betrieben wird. Daher muss dessen Bezahlung mit zu den Kosten für die Dampferzeugung gerechnet werden. In Neuerkerode wird im Zweischichtbetrieb gearbeitet, demnach fallen Gehälter und Lohnnebenkosten für zwei Angestellte an. Aus Gesprächen hat sich ergeben, dass das Überwachungspersonal wochentags zwischen 5⁰⁰ - 17⁴⁵ und an Wochenenden sowie an Feiertagen von 6⁰⁰ – 13⁰⁰ vor Ort ist. Somit ergeben sich 67,75 Arbeitsstunden je Woche.

Nach einem Bericht des statistischen Bundesamtes verdiente ein Handwerksgeselle im Jahr 2006 etwa 12,59 €/h. Um die Personalgesamtkosten zu ermitteln, wird dieser Wert mit 1,6 multipliziert, so dass Lohnaufwand von 20,14 €/h entsteht.

Um die Lohnkosten für die Dampferzeugung zu berechnen, muss die Anzahl der jährlichen Arbeitsstunden Z_{Arb} abgeschätzt werden. Um Feiertage mitzurechnen, die wie Sonntage behandelt werden, soll mit 67 Stunden in der Woche gerechnet werden. Die jährlichen Lohnkosten K_L ergeben sich dann aus der Gesamtstundenzahl und dem Stundenlohn zu 70.182 €/a

Dieser Wert dient der Kostenabschätzung und muss nicht in vollem Umfang mit den tatsächlichen Lohnkosten für die Kesselwärter übereinstimmen, er soll nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt werden. Eine Korrektur dieser Kostenstelle ist jederzeit möglich.

5.6 Zusammenfassung aller Kostenstellen

Fasst man alle Kostenstellen zusammen, ergibt sich Tabelle 12.

Kostenstelle	Kosten Pro Jahr [€]
Brennstoffkosten	142.553
Hilfsenergiekosten	5292
Hilfsstoffkosten	884
Wartungs-Reparaturkosten	7.007
Gehälter der Kesselwärter	70.182
Summe:	225.918

Tabelle 12 Kostenstellen betriebsbedingter Kosten

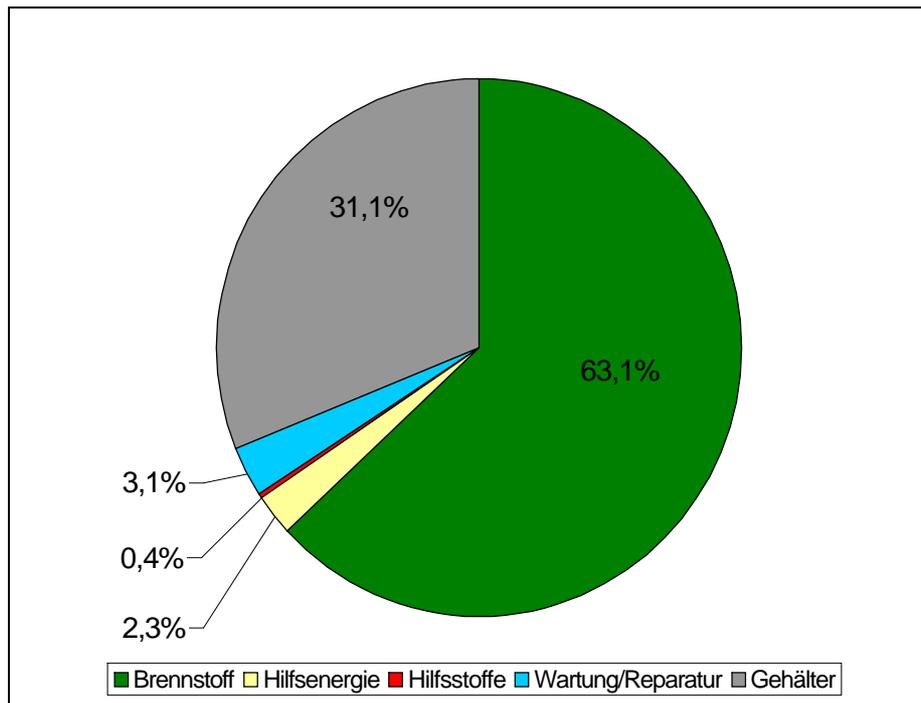


Bild 38 Grafische Darstellung

Aus dem Gesamtaufwand für den Betrieb der Dampfanlage kann man die Kosten je Kilowattstunde Dampf per Verbraucher errechnen. Bei einer Abnahmemenge von 1452 MWh/a ergibt sich ein Dampfprijs von:

- $225.918 \text{ €/a} / 1.452.000 \text{ kWh/a} = 0,156 \text{ €/kWh}$.

6 Verbesserungsmöglichkeiten

Es soll hier keine Prognose bezüglich der Einsparungen gemacht werden, wohl aber soll dieses Kapitel dazu dienen, Anregungen für eventuelle Sanierungsmaßnahmen zu geben.

6.1 Rohrnetz

6.1.1 "Sowieso"-Maßnahme; Sanierung der Erdleitung im Bereich der Küche

Als erstes bietet es sich an, auf Grund der sowieso anstehenden Sanierungsarbeiten am Netz im Bereich der Küche die weiterführende Leitung in Richtung Wäscherei hinter der Küche durch den Keller zu verlegen, um der Außenkorrosion entgegen zu wirken. Diese Maßnahme wurde 2008 bereits umgesetzt, parallel zur Diplomarbeit von Elmar Wetter-Stolte. Die neue Trasse verläuft wie in Bild 17 (Seite 18) grün eingezeichnet.

Zur Verwendung kommt dort Stahlrohr DN 80 (Wandstärke 4,05mm) mit einer ersten Dämmschicht mit 80 mm Dicke aus Mineralwolle in Form einer Rohrschale. Als zweite Schicht wird eine Lamellenmatte mit anschließender Zinkblechummantelung eingesetzt. Die Dicke der zweiten Schicht beträgt 20 mm. Für die Kondensatleitung DN 25 beträgt die Wandstärke 3,25 mm, die erste und zweite Dämmschicht jeweils 30 mm.

Im Bild sind die zwei Schichten der Rohrdämmung gut zu erkennen. Der 1mm starke Blechmantel ist an dieser Stelle noch nicht montiert. Der Hersteller der Dämmung gibt für die innen liegende Rohrschale eine Wärmeleitgruppe WLG 035 und für die äußere die WLG 040 an.



Bild 39 Neu verlegte Hauptzuleitung zur Wäscherei

Gleichzeitig sollen ca. 40 m der Erdleitung zwischen Kesselhaus und Küche erneuert werden. Ein kleiner Teil der Kellerleitung zur Wäscherei wird später durch einen abgedeckten Graben geführt.

Die in Bild 40 dargestellte Leitung wird unmittelbar hinter dem (geradeaus liegenden) erkennbaren Wanddurchbruch an die Grabenleitung angeschlossen. Die Oberflächentemperatur dieser Leitung ist nicht merklich höher als die Umgebungstemperatur der Luft an dieser Stelle. Dies deutet auf einen guten Dämmzustand der Leitung hin.

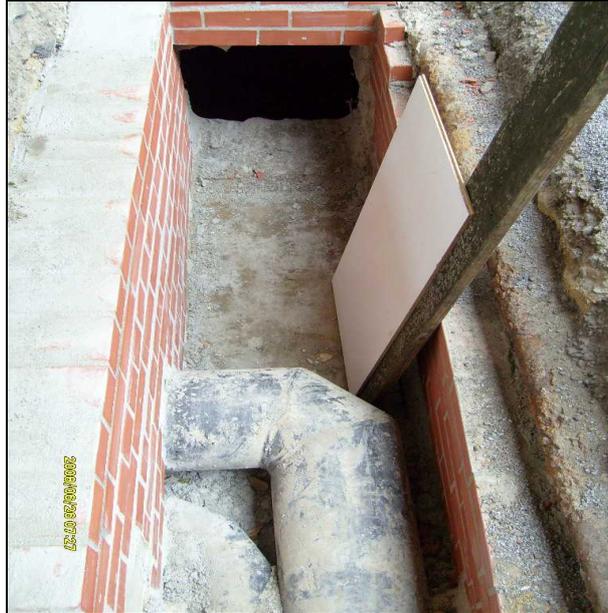


Bild 40 Grabenleitung zwischen Küchenkeller und Wäscherei

Da die vorhandene Leitung noch in relativ gutem Zustand ist und die Dämmung der neuen Erdleitung im gleichen Maße altern wird, soll eine neue Verlustabschätzung der Erdleitungen nicht mehr durchgeführt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Verteilverluste im Erdreich nicht merklich abnehmen werden.

Die neue im Keller verlegte Leitung (gut gedämmt) soll jedoch mit der alten Erdleitung zwischen Küche und Wäscherei (schlecht gedämmt) verglichen werden. Diese Leitung soll mit gleicher Länge angenommen werden wie die alte Leitung.

Setzt man die bekannten Wärmeleitgruppen und Temperaturdifferenzen der neuen und der alten Leitung ins Verhältnis, ergibt sich eine Einsparung von fast 50 %. Die neue Leitung hat eine Verlustleistung von 33 W/m, die alte hatte 60 W/m. Beim Austausch der 39 m langen Erdleitung zwischen Küche und Wäscherei durch die Kellerleitung ergibt sich eine um ca. 1100 W geringere Verlustwärmeleistung.

Gleiches gilt für die Kondensatleitung, die in derselben Trasse verläuft. Der Wärmeverlust der alten Leitung beträgt 22 W/m. Die neue Leitung hat 14 W/m. Dies vermindert die Wärmeverlustleistung in der Leitung um ca. 300 W.

Die Energieeinsparung beträgt somit während der Betriebszeit eines Jahres:

$$1,400 \text{ kW} \cdot 365 \text{ d/a} \cdot 10,5 \text{ h/a} \cdot 5/7 = 3800 \text{ kWh/a}$$

6.1.2 Übriges Rohrnetz und Behälter

Weiterhin ist zu empfehlen, nicht gedämmte Leitungen nachzudämmen oder schadhafte Stellen im Leitungsnetz zu reparieren. Vor allem Kondensatleitungen sind im Bereich der Keller über sehr lange Teilstrecken überhaupt nicht gedämmt. Eine der Kondensatleitungen ist in Bild 41 dargestellt Diese ist nicht gedämmt und undicht. Zu sehen ist eine nicht wärmege-dämmte Kondensatleitung mit Gummischelle (Pfeil) zur Abdichtung einer Leckage. Eben-falls ist im Bild zu sehen, dass die darüber liegende Dampfleitung ebenfalls nicht wärmege-dämmt ist.



Bild 41 Ungedämmte und provisorisch gedichtete Leitungen

Weiterhin sind auch die Kondensatableiter auf Undichtheiten zu überprüfen. An einem Kondensatableiter (Bereich des Wäschereikellers unterhalb des Dampfanschlusses der Mangel) sind konstante Dampfverluste sichtbar und hörbar. Alle Kondensatableiter sollten daher überprüft und ggf. ausgewechselt werden, da nicht nachgewiesen werden kann, ob diese vollständig dicht sind und somit kein Dampf in die Kondensatleitung gedrückt wird.

Als weitere Maßnahme wird empfohlen, besonders die Kondensatbehälter in der Küche und in der Wäscherei auf Undichtheiten zu überprüfen. Die Dämmung der Behälter sollte unverzüglich erneuert und verbessert werden. Die Dämmmaßnahme gilt ebenfalls für den Kondensatbehälter im Kesselhaus. Im Bereich eines Rohrkrümmers ist eine Schelle mit Gummunterlagen montiert, um das Austreten von Kondensat zu verhindern. Dieser Zustand sollte überprüft und behoben werden.

6.2 Kesselaufrüstung oder -tausch

Derzeit beträgt der Abgasverlust der Dampfkessel (brennwertbezogen) 18,3%, dies entspricht einem auf den Heizwert bezogenen Abgasverlust von 9,3%. Der mittlere CO₂-Gehalt des Abgases beträgt 9,95%, die Abgastemperatur beträgt dabei im Mittel 232°C. Durch eine Speisewasservorwärmung mittels Abgaswärmetauscher könnte man die Abgastemperatur senken und das den Kesseln zugeführte Speisewasser vorheizen.

Würde man zum Beispiel die Abgastemperatur auf 150°C abkühlen (dies ist nur ein Beispiel und keine Auslegung eines Wärmetauschers), ließe sich bei gleicher Abgaszusammensetzung der Abgasverlust q_a (heizwertbezogen) von 9,3 % auf 5,5 % senken.

$$q_{a,neu}(H_I) = \left(\frac{A_1}{CO_2^a} + B \right) \cdot (t_a - t_i) = \left(\frac{0,37}{9,95} + 0,009 \right) \cdot (150 - 30) = \underline{5,54\%}$$

$$\begin{cases} A_1(\text{Erdgas}) = 0,37 \\ B(\text{Erdgas}) = 0,009 \end{cases}$$

$$q_{a,neu}(H_S) = 1 - \frac{[1 - q_a(H_i)]}{\left(\frac{H_S}{H_I} \right)} = 1 - \frac{[1 - 0,0554]}{1,11} = 0,149 \approx 14,9\%$$

Es gibt Hersteller, die Nachrüst-Economiser (Abgaswärmeübertrager) liefern können. Mit solch einem Economiser könnte man den Abgasverlust, wie oben beispielhaft ermittelt, senken. Dies würde bei gleicher Kesselleistung (inkl. Strahlungsverluste) einer Reduzierung der ermittelten Abgasverlustwärmemenge von 490 MWh/a um 107 MWh (ca. 22%) auf 383 MWh/a entsprechen.

Durch die gleichzeitige Erhöhung der Speisewassertemperatur kann zusätzlich davon ausgegangen werden, dass die mittlere Feuerungsleistung und damit auch der Brennstoffverbrauch weiter absinkt. Die erreichbare Speisewasser- bzw. Abgastemperatur ist Sache der Auslegung des Abgaswärmeübertrager, aus diesem Grund sei nochmals darauf hingewiesen, dass hier nur beispielhaft aufgezeigt werden soll, welches Energie-Einsparpotential der derzeitige Betrieb der Dampfanlage in sich verbirgt.

Dämmung

Eine Maßnahme, die zusätzlich durchgeführt werden sollte, ist die Erneuerung der Dämmung an Kesseloberflächen sowie des Speisewasserbehälters und des Kondensatbehälters. Beim Nachdämmen der Kessel ist auf die Zugänglichkeit der (Sicherheits-) Armaturen, die zwischen den Kesseln liegen, zu achten.

Eine Verbesserung der Dämmung würde die Bereitschafts- und Strahlungsverlustwärmemenge verringern, was wiederum eine geringere Brennerleistung zum Erreichen der gleichen Kesselleistung erfordert und sich so wiederum auf den Gasverbrauch auswirkt.

Bedenkt man, dass die Strahlungsverluste mit 60 kW ca. 3% der maximalen Feuerungswärmeleistung ausmachen, kann man davon ausgehen, dass es möglich ist, die Strahlungsverluste mindestens auf die Hälfte (30 kW) zu reduzieren. Nach Informationen eines Kesselherstellers liegen die Strahlungsverluste bei modernen Dampfkesseln bei unter 1 %. Bei gleich bleibendem Betrieb entspräche dies einer Energiemenge von 259 MWh/a.

Kesseltausch

Es sollte auf Grund des Alters der Kessel alternativ darüber nachgedacht werden, ob es nicht sinnvoll ist, die alten Kessel durch neue zu ersetzen. Der Kesselwirkungsgrad ist bei heutigen Kesseln wesentlich größer, da alle am Kessel auftretenden Verluste im Gegensatz zu alten Kesseln wesentlich minimiert sind (z.B. Bessere Wärmedämmung, abgasseitig bessere Wärmetauscherflächen, Abgaswärmetauscher)

6.3 Energiebilanz und Wirtschaftlichkeit gering investiver Maßnahmen

Es wird eine Kombination von geringer investiven Maßnahmen nachfolgend überschlägig berechnet. Dies sind:

- Dämmung aller ungedämmten Rohrleitungen und Nachdämmung aller evtl. beschädigten Leitungen; Installation der Kellerleitung statt Erdleitung: die Verteilverluste sinken geschätzt von 116 MWh/a auf 100 MWh/a
- Dämmung aller Behälter: die Komponentenverluste sinken von 100 MWh/a auf geschätzte 70 MWh/a
- Dämmung der Kessel und Halbierung der Bereitschaftsverluste von 518 MWh/a auf 259 MWh/a
- Installation einer Speisewasservorwärmung/Abgaswärmeübertrager mit Erhöhung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades von 81,7 % auf 85,1%

Die Kombination dieser Maßnahmen bringt eine Gesamteinsparung von ehemals 2676 MWh/a auf nun 2210 MWh/a. Das sind 466 MWh/a oder 17 % des heutigen Wertes.

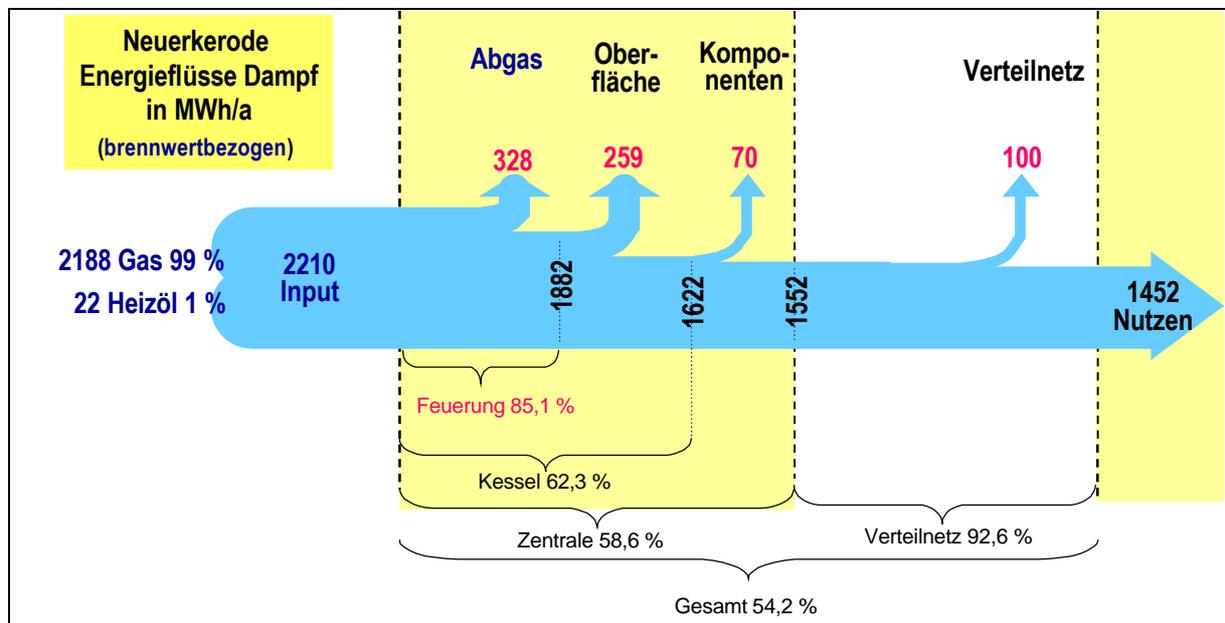


Bild 42 Geänderte Energiebilanz nach Maßnahmenumsetzung

Interessant wäre bei dieser Sanierung die obere Grenze der Investitionskosten. Damit ist der Break-Even-Point gemeint, also die Grenze zwischen wirtschaftlicher und unwirtschaftlicher Sanierung. Die Fragestellung lautet: wie hoch darf eine Investition maximal sein, damit sie sich rechnet. Es werden dabei die aufgrund der Investition vorhandenen Mehrkosten verglichen mit den eingesparten Energiekosten.

Als Grundlage dieser Überlegung soll hier ein Kapitalzins von 6 % angenommen werden. Als Preissteigerungsrate für Endenergie sollen für das DBU-Projekt Neuerkerode 8 % pro Jahr angenommen werden. Es soll hier eine Nutzungsdauer von 25 Jahren für Heizzentralen >1 MW_{th} angenommen werden.

Die unter heutigen Gesichtspunkten einsparbare Energiekostenmenge beträgt:

- Gas (brennwertbezogen): $(2651 - 2188) \text{ MWh/a} \cdot 53 \text{ €/MWh} = 24.539 \text{ €/a}$
- Heizöl (brennwertbezogen): $(25 - 22) \text{ MWh/a} \cdot 82 \text{ €/MWh} = 246 \text{ €/a}$
- Summe: 24.785 €/a (zu heutigen Preisen)

Geht man von einer Energiepreissteigerung von 8 %/a aus, liegt der mittlere Energiepreis der nächsten 25 Jahre 2,52 Mal höher als der heutige. Die Einsparsumme beträgt im Mittel also 55.766 €/a.

Die maximale Investition ergibt sich mit der Annahme einer Annuität. Bei 6 %/a für den Zins und 25 Jahren liegt die Annuität bei $a_{p,n} = 0,078$ 1/a.

Unter Verwendung heutiger bzw. künftiger Energiepreise darf die maximale Investition betragen:

- heutige Preise: 24.785 €/a / 0,078 1/a = 318.000 €
- mittlere künftige Preise: 715.000 €

Aus diesem Ergebnis lässt sich ableiten, dass es für den weiteren Betrieb der Anlage durchaus sinnvoll wäre, solche wie die oben aufgeführten Verbesserungsmaßnahmen durchzuführen. Sie sind selbst bei heutigen Preisen abschätzbar günstig.

Die Machbarkeit sowie die Kosten für die einzelnen Maßnahmen sind zu prüfen und durch Angebotseinholung zu vergleichen.

6.4 Hilfsenergieaufwendungen

Bei Erneuerungs- und Ersatzmaßnahmen aller Hilfsantriebe ist auf effiziente Pumpen- und Gebläsetechnik zu achten.

6.5 Umstellung auf 72 Stunden-Betrieb ohne Beaufsichtigung

Um weitere betriebsbedingte Kosten einzusparen und gleichzeitig den Energiepreis je kWh Dampf zu senken, wäre eine Umstellung der Betriebsart der Dampfkesselanlage auf 72-stündigen Betrieb ohne Beaufsichtigung nach TRD 604 anzustreben.

Es müsste dann nur noch alle 72 Stunden ein Sachkundiger die nach TRD 604 geforderten Überprüfungen zum sicheren Betrieb der Anlage durchführen. Der Betrieb ohne Beaufsichtigung über 72 Stunden erfordert jedoch viele zusätzliche Sicherheitsanforderungen an Kesseln, elektrischer Ausrüstung sowie der Feuerung.

Es empfiehlt sich daher bei dieser Maßnahme ein Kesseltausch, da grundlegende Bestandteile der Ausrüstung an der Anlage erneuert werden müssten. Ob bauliche Veränderungen des Kesselhauses notwendig sind, ist im Einzelnen zu klären. Darauf soll hier nicht eingegangen werden. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme hängt vom Umfang und somit von den Kosten der technischen Umbauten ab und ist zu prüfen.

Lohnkosten für die Dampferzeugung müssen bei dieser Betriebsart nur noch anteilig angerechnet werden. Dies ist ein reiner Kostengesichtspunkt, er hat keine Auswirkungen auf den Energieverbrauch.

Vorstellbar ist, auf diese Weise alle drei Tage eine Schicht zu fahren. Dies wären 121 Arbeitsschichten im Jahr oder ca. 1/6 der Schichten des bisherigen Betriebes. Dies entspricht also nur einem Sechstel der bisherigen Lohnkosten von 70.182 €/a. Die anrechenbaren Lohnkosten liegen dann bei ca. 11.700 €/a.

6.6 Verbrauchs- und Betriebsumstellung

Die Dampfverbraucher in der Küche sind fast ausschließlich Kochgeräte und eine Wasstraße. Diese Geräte könnten alle mit Strom bzw. Gas beheizt werden. Eine Umstellung der Küche allein macht jedoch wenig Sinn, da der jährliche Dampfverbrauch in der Küche unter 10 % des insgesamt erzeugten Dampfes beträgt.

Die Wäscherei müsste also ebenso umgestellt werden. Welche Geräte in dieser Größenordnung in der Wäscherei mit Strom oder Gas beheizt werden können, ist zu prüfen. Während der Arbeit von Herrn Elmar Wetter-Stolte war festzustellen, dass zumindest Trockner und Waschschleudermaschinen angeboten werden, welche mit Gas beheizt werden können.

Wenn zwar keine Vollumstellung gelingt, ist eine Halbierung des Dampfverbrauches ebenfalls sinnvoll. Dann könnte ein Kessel abgeschaltet werden (vorausgesetzt Verbrauchsspitzen können abgedeckt werden). Um jedoch die Versorgungssicherheit zu gewährleisten kann eine Kesselfolgeschaltung, wie bei den Nahwärmekesseln installiert werden. So wäre beispielsweise eine monatliche Umschaltung der Kessel möglich. (monatlich, damit die thermische Beanspruchung der Kessel geringer ist, weil die Kessel nicht ständig aufgeheizt und abgekühlt werden). Auch bei dieser Variante ist ein Kesseltausch zu empfehlen, da Kesselverluste bei neueren Kesseln wie erwähnt sehr viel kleiner ausfallen werden.

7 Ausblick und Anhang

Zum Abschluss des Berichtes soll zur Verwendung der Erkenntnisse ein Ausblick auf die anderen Teilberichte sowie eine Übersicht der Anhänge zu diesem Bericht gegeben werden.

7.1 Ausblick auf die anderen Teilberichte

01 "Übersichtsbericht"	Wiedergabe der wichtigen Erkenntnisse dieses Berichtes in der Zusammenfassung
02 "Mediengrunddaten"	Dampfbilanz als Grundlage für den Dampfpreis und die Gesamtbilanz Neuerkerodes Ermittlung von Primär- und CO ₂ -Faktoren anhand der Bilanz
03 "Investition und Instandhaltung"	---
04 "Gebäude"	Einordnung von Küche und Wäschereikosten
05 "Nahwärme"	---
06 "Dampf"	---
07 "Elektroverbraucher"	---

7.2 Überblick über die Anlagen zu diesem Teilbericht

A Übersichtbericht

- Bericht als PDF

B Berechnungen, Bilder, Tabellen

- Bilder: Grafiken für den Bericht

C Fotos

- Abgaswege, Behälter, Brenner, Dampfmengenmessung, Filter, Kessel, Leitungen, Pumpen, Regelung, Sicherheitstechnik, Thermographiemessungen, Wartungsfotos

D Diplomarbeit Elmar Wetter-Stolte

- Diplomarbeit als Datei
- Dampfmessung: Messwerte und Auswertung
- Berechnungen: Wartungskosten, Leitungsnetz, Hilfsenergie
- technische Unterlagen: Messumformer, Rohrleitungsdämmung, Pumpen

Alle weitere Quellen zu den hier verfassten Texten finden sich in den Anlagen.