

Dr.-Ing. Wolfgang Eden
Dr.-Ing. Wolf-Dieter Steinmann

112

**Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten
CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische
Optimierungsmaßnahmen**

Forschungsbericht Nr. 112, Dezember 2010



**Forschungsvereinigung
Kalk-Sand eV**

Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energie technische Optimierungsmaßnahmen

Abschlussbericht über ein Forschungsvorhaben,
gefördert unter dem Az.: 26378-24/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Berichtersteller:

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Dr.-Ing. Wolf-Dieter Steinmann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik
in der Helmholtz-Gemeinschaft,
Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart

Hannover 25.12.2010

Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az

Referat

Fördersumme

Antragstitel Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktions-
technisch bedingten CO₂-Emissionen bei der Kalksandstein-
Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen

Stichworte Energieeinsparung, Reduzierung CO₂- Emissionen

Laufzeit

Projektbeginn

Projektende

Projektphase(n)

24 Monate**01.10.2008****30.09.2010****1**

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV
Entenfangweg 15
30419 Hannover

Tel 05 11 / 27 95 4-60

Fax 05 11 / 27 95 4-54

Projektleitung

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Bearbeiter

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Kooperationspartner Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
in der Helmholtz-Gemeinschaft, Institut für Technische Thermodynamik
Dr. rer. nat. Rainer Tamme und Dr.-Ing. Wolf-Dieter Steinmann
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die Kalksandsteinproduktion ist traditionell geprägt. Aufgrund der sich weiter fortschreitenden Umweltbelastung und der fortlaufenden dramatischen Energiekostensteigerung ist eine intensive Befassung mit dem Thema "Energieeinsparung" auch für die Kalksandsteinindustrie unbedingt erforderlich. Der Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV hat deshalb zur Begleitung und Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Energieverbräuche und der Umweltauswirkungen einen unternehmensübergreifenden "*Expertenkreises Energieeinsparung*" gegründet. Dabei sollen auch verstärkt neue Komponenten und Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bei der Kalksandsteinproduktion untersucht werden.

Die Effektivität der verschiedenen technischen Möglichkeiten und deren Kombinationen ist jedoch aufgrund fehlender Daten über die komplexen Energieströme noch nicht ausreichend bekannt und soll deshalb mit einem gemeinschaftlichen und unternehmensübergreifenden Forschungsprojekt ermittelt werden, so dass organisatorische und technische Empfehlungen für Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs möglich sind. Deshalb wurde ein Forschungsprojekt zur systematischen Ableitung von technischen Maßnahmen zur Reduzierung der Energieverbräuche gestartet, mit dem umsetzbare und praxisnahe Musterlösungen als Vorlage für alle 85 Kalksandsteinwerke in Deutschland dienen können.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Das Projekt untergliedert sich in 4 aufeinander aufbauende Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 1: Bestandsaufnahme in 8 für die deutsche Kalksandsteinindustrie repräsentative Kalksandsteinwerke (Erfassung der Anlagentechnik und der Energieverbräuche)
- Arbeitspaket 2: Physikalische Modellbildung des Kalksandsteinproduktionsprozesses und Implementierung eines modularen Simulationswerkzeuges
- Arbeitspaket 3: Einsatz des Simulationswerkzeuges zur Ableitung von technischen Maßnahmen für die Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen
- Arbeitspaket 4: Ansätze für technischen Anlagenoptimierungen unter Berücksichtigung von betrieblichen Aspekten

Ergebnisse und Diskussion

Kalksandsteine werden aus den natürlichen Rohstoffen Kalk, Quarzsand und Wasser hergestellt. Die Erzeugung erfolgt in gespannter Wasserdampfatosphäre durch eine Autoklavhärtung verdichteter Rohlinge bei einer Temperatur von rd. 200 °C und einem Druck von rd. 16 bar. Hierbei entstehen Calciumsilikathydrate, die die Sandkörner zu einem dauerhaften Gerüst verbinden. Zur Herstellung von Kalksandsteinen wird derzeit im Durchschnitt eine Energiemenge in Höhe von etwa 120 kWh/t (elektrischer Strom und Heizenergie) benötigt.

Die erforderliche Energiemenge hängt von der Art und dem Umfang der technischen Ausstattung, der Fahrweise, der Anzahl der Schichten und vor allem auch von der marktbedingten Auslastung der Werke ab. Die Wirksamkeit von technischen und organisatorischen Lösungen zur Reduzierung des Wärmeenergieverbrauchs sind also stark werksabhängig. Hinzu kommt, dass der Auslastungsgrad der Kalksandsteinwerke derzeit konjunkturell gering ist.

In zahlreichen Kalksandsteinwerken wurde eine Bestandsaufnahme der technischen Ausrüstung und der Energieverbräuche durchgeführt, wobei Jahres-, Monats- und Wochengänge berücksichtigt wurden. Hier zeigte sich ein relativ heterogenes Bild. Anschließend wurde der Produktionsprozess hinsichtlich seiner thermischen Beschaffenheit analysiert. Dabei wurde sowohl ein Einzelautoklav als auch eine Autoklavengruppe näher betrachtet. Im nächsten Schritt wurden Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz (z.B. thermische Energiespeicher, Rückgewinnung und Nutzung von Niedertemperaturenergie und Abwärme) abgeleitet. Als Ansätze zur Anlagenoptimierung sind kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen zu unterscheiden.

In dieser Studie wurden insbesondere auch auf neue Technologien hingewiesen, deren Einsatz in der Kalksandsteinindustrie noch nicht erprobt ist. Die jeweils angedachte Technik ist derzeit noch nicht verfügbar und vor einer Anwendung ist eine jeweilige Entwicklung/Anpassung an individuelle betriebspezifische Gegebenheiten in den einzelnen Kalksandsteinwerken erforderlich. Sämtliche oben genannten Maßnahmen sind in diesem Sinne derzeit noch als Forschungsergebnisse theoretisch zu betrachten und bedürfen im Fall einer Realisierung, je nach Art, eine Abstimmung mit den zuständigen Aufsichts- bzw. Überwachungsbehörden. In allen Fällen sind wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Änderungen der Druckbehälteranlage und der Rohrleitungen sowie die Kesselfahrweise sind in jedem Fall zwingend vorher mit den zuständigen Aufsichtsbehörden abzustimmen. Die Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Grundlagenerkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werkspezifischer Gegebenheiten durch eingehende Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk und im Labor zu überprüfen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Nach Vorliegen der Kenntnisse über die zu erwartende Wirksamkeit der ausgewählten technischen Lösungen können diese im Zuge ihrer Veröffentlichung als Branchenleitfaden der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV für alle Kalksandsteinwerke in der Bundesrepublik Deutschland als Mustervorlage dienen.

Die neuen Erkenntnisse werden in Fachbroschüren und bei der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e. V. und bei der DLR entsprechend publiziert. Auch werden die Ergebnisse im Internet auf der homepage der Forschungsvereinigungen und der Industrieverbände abrufbar sein.

Des Weiteren werden die Ergebnisse auf Seminaren und Tagungen, insbesondere im Energietechniksektor und in der Kalksandsteinindustrie, sowie im Rahmen von direkten Beratungsgesprächen mit den Mitgliedern der Forschungsvereinigungen vorgestellt.

Darüber hinaus werden die Erkenntnisse bei Vortrags- und Fortbildungsveranstaltungen präsentiert und können auf diese Weise in die Praxis übernommen werden. Dieses Vorhaben wurde durch den Projektbegleitenden Ausschuss betreut. Dieser ist überwiegend aus Mitarbeitern kleiner und mittlerer Unternehmen aus der Kalksandstein-Industrie zusammengesetzt. Durch die regelmäßigen Sitzungen und die durchgehende Kommunikation vor, während und auch nach der Laufzeit wurde das jeweils aktuelle Wissen in die Unternehmen und damit auch in die Produktionsstätten hineingetragen.

Als sinnvolle Ergänzung zur Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse ist die Durchführung eines Kalksandstein-Energieeinspar-Workshops (Meisterseminare Kalksandstein 2012 ff.) für die Kalksandsteinindustrie vorgesehen. Dazu werden alle Vertreter dieser Forschungsaktivitäten als Referenten eingeladen.

Fazit

Die Forschungsergebnisse können für eine Reduzierung des Energieverbrauchs bei der Kalksandsteinherstellung genutzt werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <http://www.dbu.de>

Verzeichnis von Bildern und Tabellen	7
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	9
1 Zusammenfassung	10
2 Einleitung	11
2.1 Allgemeines	11
2.2 Stand der Forschung	13
2.2.1 Energieverbrauch	13
2.2.2 Emissionen	15
3 Bestandsaufnahme in den Kalksandsteinwerken	16
3.1 Datenerfassung	16
3.2 Energieverbrauchsdaten aus Kalksandsteinwerken	24
4 Thermische Analyse des Kalksandstein-Produktionsprozesses	34
4.1 Physikalisches Modell des Härteprozesses	34
4.2 Analyse des Einzelautoklaven	39
4.3 Analyse der Autoklavengruppe	42
4.4 Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz	44
5 Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz	45
5.1 Verstromung von überschüssigem Abdampf	45
5.2 Einsatz thermischer Energiespeicher	48
5.2.1 Grundkonzepte	48
5.2.2 Einsatzoptionen für Energiespeicher	52
5.3 Rückgewinnung und Nutzung von Niedertemperaturenergie	54
5.4 Nutzung von Abwärme	56
5.5 Elektrische Energie	59
6 Ansätze zur Anlagenoptimierung	61
6.1 Kurzfristige Maßnahmen	61
6.2 Mittelfristige Maßnahmen	62
6.3 Langfristige Maßnahmen	63
6.4 Abschätzung der Kosteneinsparung	64
7 Literatur	65
8 Anhang	
8.1 Bilder, Tabellen und Diagramme	66
8.2 Liste der Forschungsberichte der FV KS eV	73

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

- Bild 1.1: Produktionsschema der Kalksandstein-Herstellung
- Bild 1.2: Anteil der einzelnen Produktionsschritte im Kalksandsteinwerk am Primärenergieverbrauch
- Bild 2.1: Absolute Anteile der Rohstoffe, Produktion, Transporte und Verpackung am regenerativen und nichtregenerativen Primärenergiebedarf zur Herstellung von Kalksandsteinen in [MJ / t]
- Bild 2.2: Aufteilung des Bedarfs erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie für die Herstellung von Kalksandsteinen
- Tab. 2.1: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Herstellung von 1 Tonne Kalksandstein
- Bild 2.3: Relative Beiträge einzelner Sektoren zu den Umweltwirkungen (ADP, GWP, ODP, AP, EP und POCP) bei der Herstellung von Kalksandsteinen
- Bild 3.1: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 1
- Bild 3.2: Wochengang des Energieverbrauchs - Werk 2
- Bild 3.3: Wochengang des Energieverbrauchs - Werke 3 bis 5
Mittelwerte aus der Produktion eines ganzen Jahres
- Bild 3.4: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 6
- Bild 3.5: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 7
- Bild 3.6: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 8
- Bild 3.7: Arithmetisches Mittel des spezifischen Verbrauchs für die einzelnen Wochentage
- Bild 3.8: Relativer massenspezifischer Verbrauch für die Monate Juli bis November, bezogen auf Wert für Juli ($P = 65,6 \text{ kWh/t}$) - Werk 8
- Bild 3.9: Relative Produktion für die Monate Juli bis November, bezogen auf Wert für Juli
- Tab. 3.1: Beispiel 1 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8
- Tab. 3.2: Beispiel 2 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8
- Tab. 3.3: Beispiel 3 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8
- Tab. 3.4: Beispiel 3 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8
- Bild 4.1: Komponenten des hydrothermalen Härteprozesses
- Tab. 4.1: Abschätzung der Kalksandsteinmasse im Autoklaven für die Berechnungen
- Bild 4.2: Aufbau des Referenz-Kalksandsteinwerkes für die Berechnungen
- Bild 4.3: Modell des beladenen Autoklaven mit betrachteten Subkomponenten und Stoff- bzw. Wärmeströmen über die Modellgrenzen.
- Bild 4.4: Beispielhafte Energieverteilung im Autoklaven bei der Druckanhebung durch Zufuhr von Sattedampf
- Bild 4.5: Prozentualer Anteil der Subkomponenten am Gesamtenergiebedarf während des Hochfahrens des Autoklaven
- Bild 4.6: Überströmen Sattedampf, Starttemperatur hochfahrender Autoklav $T = 20 \text{ °C}$, Luft-/Wasserdampfatosphäre
- Bild 4.7: Überströmen Sattedampf, Starttemperatur hochfahrender Autoklav $T = 100 \text{ °C}$, Wasserdampfatosphäre
- Bild 4.8: Überströmen Sattedampf, abfahrender Autoklav mit doppelter Masse Rohlinge des hochfahrenden Autoklaven
- Bild 4.9: Überströmen Sattedampf, abfahrender Autoklav mit 50% der Masse Rohlinge des hochfahrenden Autoklaven
- Bild 5.1: Theoretischer Maximalwert eines Umwandlungsprozesses in Abhängigkeit der Temperatur der verfügbaren Abwärme
- Bild 5.2: Leistungsspezifische Investitionskosten verschiedener Konzepte zur Umwandlung von Abwärme in Strom

- Bild 5.3: Vereinfachte Prinzipdarstellung Ruths-Speicher
- Bild 5.4: Speicherkonzept bei dem thermische Energie in ein flüssiges Speichermedium eingekoppelt wird, das über einen Wärmeüberträger zwischen zwei Behältern umgepumpt wird
- Tab. 5.1: Übersicht Speichermaterialien für sensible Wärmespeicher
- Bild 5.4: Rohrregister 400 kWh, Testmodul vor dem Vergießen mit Beton
- Bild 5.5: Testmodul nach dem Vergießen mit Beton, noch ohne Isolation
- Tab. 5.2: Latentwärmespeichermaterialien
- Bild 5.6: Nutzung Latentwärmespeicher zur Zwischenspeicherung von Abwärme
- Bild 5.7: Vereinfachte Prinzipschaltung Autoklav mit Thermoölkreislauf
- Bild 5.8: Autoklav als Speicher mit Wasserinventar, Beladefall
- Bild 5.9: Autoklav als Speicher mit Wasserinventar, Entladefall
- Bild 5.10: Schaltschema für Vorwärmung der Rohlinge im Autoklaven in Feuchtluftatmosphäre
- Bild 5.11: Schaltschema für Vorwärmung der Rohlinge in separaten Feuchteammern
- Bild 5.12: Trocknen der Steine nach Verlassen des Autoklaven zur Rückgewinnung der Restwärme
- Bild 5.13: Vereinfachte Darstellung Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampferzeugung aus Abgasen mit Speicher zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen.
- Bild 5.14: Nutzung von industrieller Abwärme durch Kalksandsteinwerk, Abgabe der Abwärme des Kalksandsteinwerkes an einen Niedertemperatur-Wärmeverbraucher

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen:

T	Temperatur
p_e	Druck
MJ	Megajoule
kW	Kilowatt
t	Tonne
m	Masse
m_D	Leistung des Dampferzeugers [t/h]
d_w	Wandstärke
V_w	Wasservolumen im Dampferzeuger
W_v	Oberflächenverluste des Dampferzeugers
m_{th}	Thermische Masse des Dampferzeugers
Ø	Durchmesser
T_A	Temperatur der Autoklaven
T_H	Temperatur der Härtewagen
T_R	Temperatur der Rohlinge
T_L	Außenlufttemperatur
H	Enthalpie
U	innere Energie
Q	Wärmeenergie, Abwärmeverluste

1 ZUSAMMENFASSUNG

Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus den natürlichen Rohstoffen Kalk, Quarzsand und Wasser hergestellt werden. Die Erzeugung erfolgt in gespannter Wasserdampfatmosfera durch eine Autoklavhärtung mechanisch verdichteter Rohlinge bei einer Temperatur von rd. $T = 200 \text{ °C}$ und einem Druck von rd. $p_e = 16 \text{ bar}$. Hierbei entstehen als Mineralphasen Calciumsilikathydrate, die die Sandkörner zu einem dauerhaften Gerüst verbinden.

Zur Herstellung von Kalksandsteinen wird derzeit im Durchschnitt eine Energiemenge in Höhe von etwa 120 kWh/t (elektrischer Strom und Heizenergie) benötigt [1]. Die erforderliche Energiemenge hängt von der Art und dem Umfang der technischen Ausstattung, der Fahrweise (Pressen- oder Härtekesselauslastung, Wochengang), der Anzahl der Schichten und vor allem auch von der marktbedingten Auslastung der Werke ab. Die Wirksamkeit von technischen und organisatorischen Lösungen zur Reduzierung des Wärmeenergieverbrauchs sind also stark werksabhängig. Hinzu kommt, dass der Auslastungsgrad der Kalksandsteinwerke derzeit konjunkturell gering ist.

In zahlreichen Kalksandsteinwerken wurde eine Bestandsaufnahme der technischen Ausrüstung und der Energieverbräuche durchgeführt, wobei Jahres-, Monats- und Wochengänge berücksichtigt wurden. Hier zeigte sich ein relativ heterogenes Bild. Anschließend wurde der Kalksandstein-Produktionsprozess hinsichtlich seiner thermischen Beschaffenheit analysiert. Dabei wurde sowohl ein Einzelautoklav als auch eine Autoklavengruppe näher betrachtet. Im nächsten Schritt wurden Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz (z.B. thermische Energiespeicher, Rückgewinnung und Nutzung von Niedertemperaturenergie und Abwärme) abgeleitet. Als Ansätze zur Anlagenoptimierung sind kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen zu unterscheiden.

In dieser Studie wurden insbesondere auch auf neue Technologien hingewiesen, deren Einsatz in der Kalksandsteinindustrie noch nicht erprobt ist. Die jeweils angedachte Technik ist derzeit noch nicht verfügbar und vor einer Anwendung ist eine jeweilige Entwicklung/Anpassung an individuelle betriebsspezifische Gegebenheiten in den einzelnen Kalksandsteinwerken erforderlich. Sämtliche oben genannten Maßnahmen sind in diesem Sinne derzeit noch als Forschungsergebnisse theoretisch zu betrachten und bedürfen im Fall einer Realisierung, je nach Art, eine Abstimmung mit den zuständigen Aufsichts- bzw. Überwachungsbehörden. In allen Fällen sind wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Änderungen der Druckbehälteranlage und der Rohrleitungen sowie die Kesselfahrweise sind in jedem Fall zwingend vorher mit den zuständigen Aufsichtsbehörden abzustimmen.

Die Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Grundlagenerkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werkspezifischer Gegebenheiten durch eingehende Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk und im Labor zu überprüfen. Die Forschungsvereinigung Kalksand eV leistet bei dieser Arbeit Unterstützung.

2 EINLEITUNG

2.1 Allgemeines

Die deutsche Kalksandsteinindustrie existiert seit 1894. Sie produziert heute mit rd. 1.700 Beschäftigten an bundesweit dezentral angesiedelten 85 Standorten etwa 6 Mio. t Kalksandstein-Material pro Jahr. Kalksandsteine werden für tragendes und nicht tragendes, schalldämmendes Mauerwerk mit hoher Festigkeit im Hochbau verwendet. Kalksandsteine sind Mauersteine, die aus den natürlichen Rohstoffen Kalk, Quarzsand und Wasser hergestellt werden. Die Dampfhärtung der mechanisch verdichteten Rohlinge erfolgt in gespannter Wasserdampf Atmosphäre durch eine Autoklavhärtung bei einer Temperatur von rund $T = 200\text{ °C}$ und einem Druck von rd. $p_e = 16\text{ bar}$. Siehe Bild 1.1.

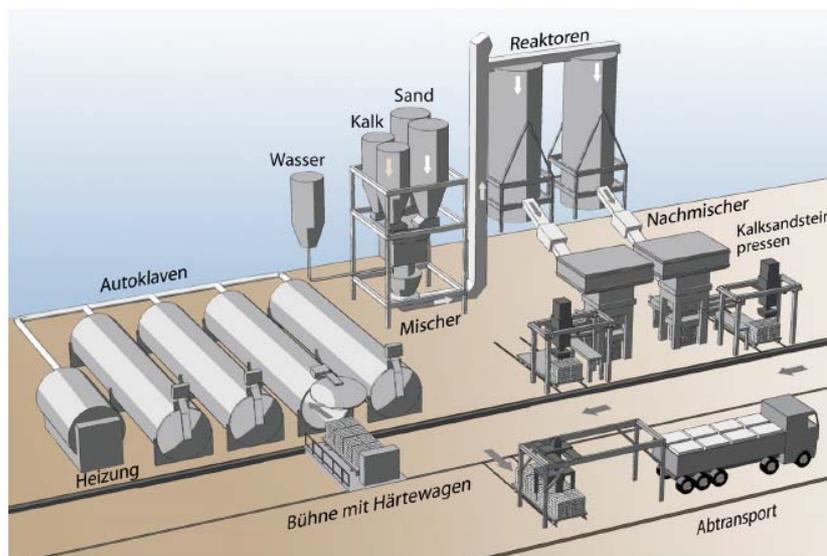


Bild 1.1: Produktionsschema der Kalksandstein-Herstellung (Quelle: Lasco Umformtechnik)

Aus der Ökobilanz für den Kalksandstein geht hervor, dass im Durchschnitt für die Herstellung einer Tonne Kalksandstein-Material rd. 1.105 MJ an Primärenergie aufgewendet werden müssen. Ca. 52 % werden für die Rohstoffgewinnung, deren Aufbereitung und Transport verwendet. Hier ragen die Gewinnung und das Brennen des Kalksteins mit rd. 39 % heraus. Vom Gesamtenergieverbrauch entfallen etwa die Hälfte auf die Kalksandstein-Produktion in den Werken. Das Bild 1.2 zeigt die Verteilung des Energieverbrauchs im Kalksandsteinwerk auf die einzelnen Produktionsschritte [1].

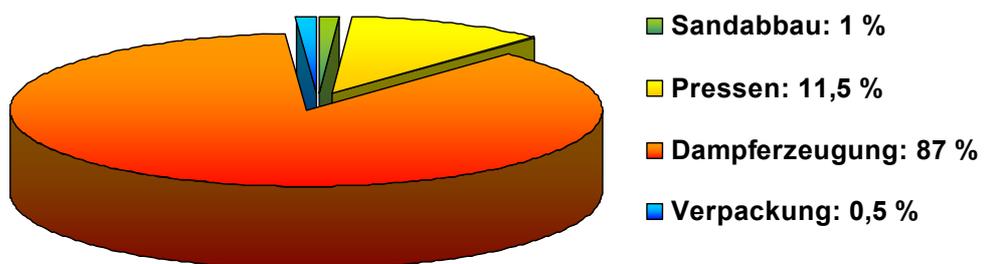


Bild 1.2: Anteil der einzelnen Produktionsschritte im Kalksandsteinwerk am Primärenergieverbrauch [1]

Die Kalksandsteinproduktion ist traditionell geprägt. Aufgrund der fortschreitenden Umweltbelastung und der weiteren Energiekostensteigerung ist eine intensive und fortlaufende Befassung mit dem Thema "Energieeinsparung" auch für die Kalksandsteinindustrie unbedingt erforderlich. Der Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV hat deshalb in 2007 zur Begleitung und Umsetzung von Maßnahmen zur Reduzierung der Energieverbräuche und der Umweltauswirkungen unter dem Technischen Ausschuss einen unternehmensübergreifenden "*Expertenkreises Energieeinsparung*" gegründet. In diesem Arbeitskreis sollen etablierte technische Maßnahmen hinterfragt und neue Konzepte zur Steigerung der Energieeffizienz hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit bei der Kalksandsteinproduktion untersucht werden.

Die Effektivität der verschiedenen technischen und organisatorischen Möglichkeiten und deren Kombinationen ist jedoch aufgrund fehlender Daten über die komplexen Energieströme (Dampfmenngen, Temperaturen, Grad der Kreislaufführung,...) nicht ausreichend bekannt und wurde deshalb mit einem gemeinschaftlichen und unternehmensübergreifenden Forschungsprojekt so weit wie möglich ermittelt. Auf dieser Basis sollen organisatorische und technische Empfehlungen für Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs ausgesprochen werden. Deshalb wurde ein Forschungsprojekt zur Suche nach technischen Maßnahmen zur Reduzierung der Energieverbräuche durchgeführt, mit dem umsetzbare und praxisnahe Musterlösungen als Vorlage für die derzeit rd. 85 Kalksandsteinwerke in Deutschland dienen können. Das durchgeführte Projekt untergliedert sich in vier aufeinander aufbauende Arbeitspakete:

- Arbeitspaket 1:
Bestandsaufnahme in mehreren für die deutsche Kalksandsteinindustrie repräsentative Kalksandsteinwerke (Erfassung der Anlagentechnik und der Energieverbräuche)
- Arbeitspaket 2:
Physikalische Modellbildung des Kalksandsteinproduktionsprozesses und Implementierung eines modularen Simulationswerkzeuges
- Arbeitspaket 3:
Einsatz des Simulationswerkzeuges zur Ableitung von technischen Maßnahmen für die Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen
- Arbeitspaket 4:
Empfehlungen für technischen Anlagenoptimierungen unter Berücksichtigung von Investitions- und Produktionskosten sowie betrieblichen Aspekten

2.2 Stand der Forschung

2.2.1 Energieverbrauch

Den Hauptanteil des Energieaufwandes macht die Dampfhärtung der Kalksandstein-Rohlinge in den Härtekesseln aus (ca. 85 %). Die Produktion erfolgt im Wochenzyklus. Die systembedingt im Verlauf einer Produktionswoche kontinuierlich zunehmende Abwärme aus der Steinproduktion wird zurzeit nur teilweise für die Speisewasservorwärmung bei der Dampferzeugung genutzt. Ein derzeit leider nicht nutzbarer Energieanteil verlässt durch Ablassen von Überschusdampf mit niedrigem Druck ($p_e = 3 \text{ bar}$) in die Atmosphäre und durch das Ableiten warmen Kondensatabwassers als Überschusswärme den Herstellprozess. Die Energiemengen dieser Teilströme waren bislang nicht genau bekannt.

Der derzeitige Energieverbrauch für die Kalksandstein-Produktion liegt nach [2] bei rd. 120 kWh/t Kalksandstein-Material (ohne vorgeschaltete Prozessketten). Gemäß der Umwelt-Produktdeklaration für Kalksandsteine liegt der nicht erneuerbare Primärenergieinhalt von Kalksandsteinen bei 1.058 MJ/t und der erneuerbare bei 47,6 MJ/t [3]. Des Weiteren gehen aus der EPD folgende Daten hervor:

Nicht regenerativer Primärenergiebedarf:

Die Vorproduktion des enthaltenen Kalks trägt zu ca. 39 % zum nicht regenerativen Primärenergieverbrauch bei. Die Produktion, d.h. der Bedarf an Strom und thermischer Energie dominiert den fossilen Primärenergiebedarf mit 53 %. Die Vorproduktion der Rohstoffe (inklusive Branntkalk) trägt mit 43 % zum nicht regenerativen Primärenergiebedarf bei. Der Anteil der Verpackung verursacht 2 % und die Transporte ebenfalls 2 %.

Regenerativer Primärenergiebedarf:

Zusätzlich werden noch 47,6 MJ regenerative Energien für die Herstellung von 1 Tonne Kalksandstein verbraucht. Der größte Teil hiervon wird für die Transportverpackung (Holzpalette) benötigt.

Primärenergiebedarf, gesamt:

Der gesamte Primärenergiebedarf, d.h. die Summe aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf beträgt rd. 1.105 MJ pro Tonne Kalksandstein. Dieser ist hauptsächlich von den Zuschlägen als auch von der Strom- und Energiebereitstellung der Produktion beeinflusst. Zum gesamten Primärenergieverbrauch tragen zu 51 % die Produktion bei, die Rohstoffe (insbesondere Kalk) mit 42 % und die Verpackung mit 5 %. Der Anteil der Transporte ist mit 2 % vergleichsweise gering. Bild 2.1 veranschaulicht die Beiträge einzelner Sektoren zum Primärenergieverbrauch (erneuerbar und nicht erneuerbar).

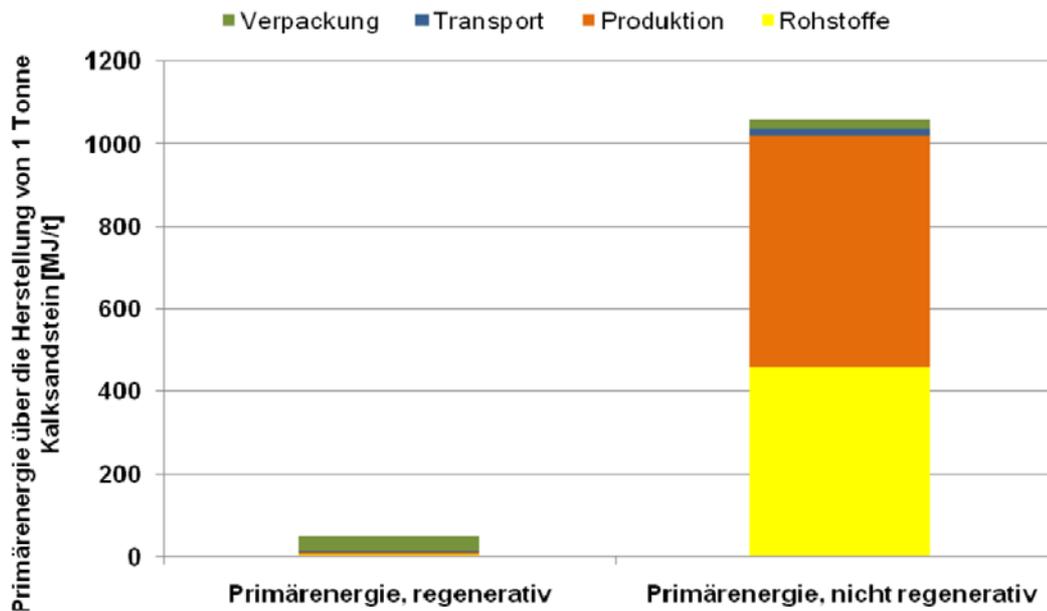


Bild 2.1: Absolute Anteile der Rohstoffe, Produktion, Transporte und Verpackung am regenerativen und nichtregenerativen Primärenergiebedarf zur Herstellung von Kalksandsteinen in [MJ / t]

Die nähere Auswertung des Primärenergiebedarfs in Bild 2.2 zur Herstellung von 1 Tonne Kalksandstein zeigt, dass als wesentlicher Primärenergieträger Erdgas eingesetzt wird, und dass die Sonnenenergie die verwendeten regenerativen Energien dominiert. Dabei dient Sonnenenergie primär zum Wachstum von Biomasse (für die Produktion von Holzpaletten) und sekundär zur Stromerzeugung.

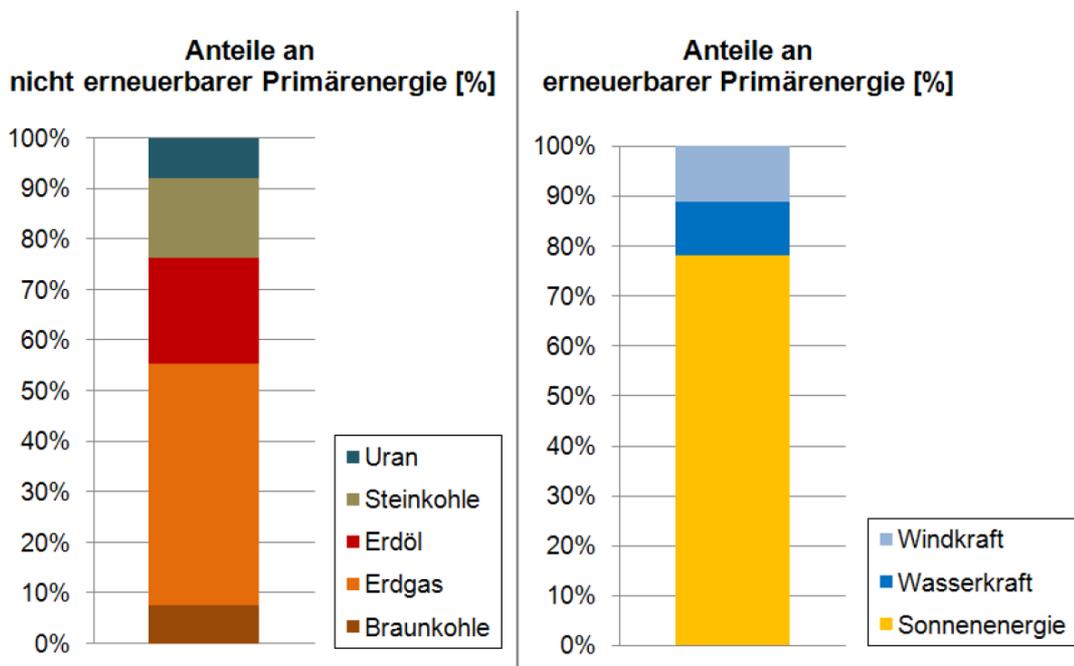


Bild 2.2: Aufteilung des Bedarfs erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie für die Herstellung von Kalksandsteinen

2.2.2 Emissionen

Pro Tonne Kalksandstein-Material wird mit der bisherigen Technologie laut KS-Ökobilanz [3] eine Menge von rd. 150 kg CO₂ emittiert. Aus der Umweltproduktdeklaration für Kalksandsteine und der darin enthaltenen aktualisierten Ökobilanz aus 2009 [3] gehen die Beiträge der Herstellung von Kalksandstein zu den Wirkungskategorien Abiotischer Ressourcenverbrauch, Treibhauspotenzial (GWP), Ozonabbaupotenzial (ODP), Versauerungspotenzial (AP), Überdüngungspotenzial (EP) und Sommersmogpotenzial (POCP) hervor, siehe Tabelle 2.1.

Auswertegröße	Einheit	kg / t Kalksandstein
Abiotischer Ressourcenverbrauch	[kg Sb-Äqv.]	0,47
Treibhauspotenzial (GWP)	[kg CO ₂ -Äqv.]	133,5
Ozonabbaupotenzial (ODP)	[kg R11-Äqv.]	2,28E-06
Versauerungspotenzial (AP)	[kg SO ₂ -Äqv.]	0,120
Eutrophierungspotenzial (EP)	[kg PO ₄ -Äqv.]	0,017
Sommersmogpotenzial (POCP)	[kg Ethen-Äqv.]	0,012

Tabelle 2.1: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Herstellung von 1 Tonne Kalksandstein

Bild 4 zeigt die relativen Beiträge der KS-Stein-Herstellung, gegliedert nach den Subsystemen Vorproduktion der Rohstoffe (Kalk, Sand etc.), Produktion (inkl. Vorproduktion der Hilfsstoffe, energetische Aufwendungen im Werksbetrieb und Entsorgung anfallender Reststoffe), Transport und Verpackung.

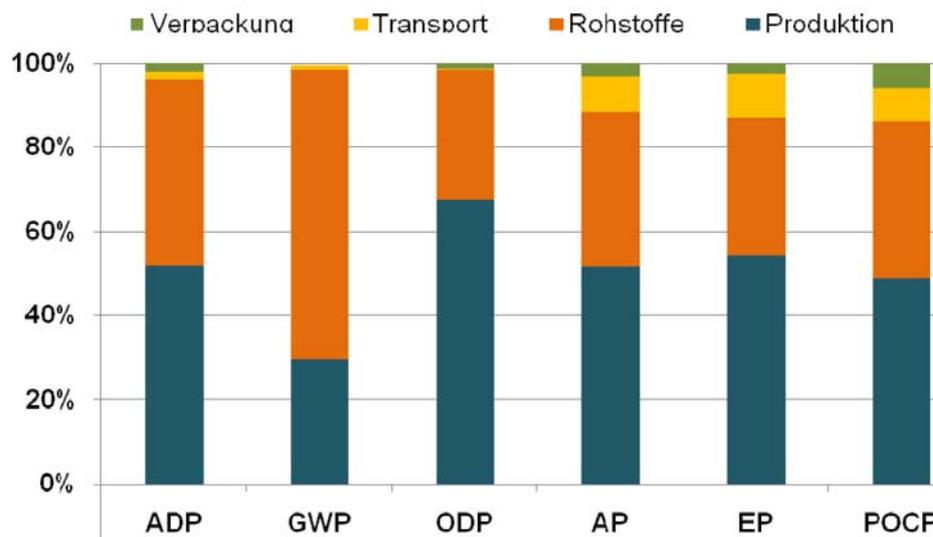


Bild 2.3: Relative Beiträge einzelner Sektoren zu den Umweltwirkungen (ADP, GWP, ODP, AP, EP und POCP) bei der Herstellung von Kalksandsteinen

3 BESTANDSAUFNAHME IN KALKSANDSTEINWERKEN

3.1 Datenerfassung

Die Datenerfassung bei der Erstellung der Ökobilanz 2009 [3] erstreckte sich auf insgesamt 49 Kalksandsteinwerke, wobei in 8 Kalksandsteinwerken eine weitergehende detailliertere Datenerfassung und Bestandsaufnahme der technischen Ausrüstung durchgeführt wurde. Die Datenbasis der Ökobilanz 2009 wird im Folgenden näher beschrieben:

Die hier enthaltene Ökobilanz wurde nach den Vorgaben der ISO 14040 [4] und DIN EN ISO 14044 [5] durchgeführt sowie nach den im PCR-Dokument Kalksandstein [6] und den im allgemeinen Leitfaden des Instituts Bauen und Umwelt e.V. beschriebenen Randbedingungen. Sie umfasst alle relevanten Lebenszyklusphasen und beruht auf aktuellen Datenerfassungen in Werken des Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. aus dem Jahr 2008 für die Rezepturen und den Werksbetrieb. Die Lebenszyklusanalyse ist repräsentativ für die Werke des Bundesverbandes Kalksandsteinindustrie e.V. bzw. der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV.

Deklarierte Einheit:

Die Deklaration bezieht sich auf die Herstellung von einer Tonne Kalksandstein.

Systemgrenzen bei der Datenerfassung:

Die Lebenszyklusanalyse für die Herstellung der betrachteten Kalksandsteine umfasst die Lebenswegabschnitte „von der Wiege bis zum Werkstor“ (cradle to gate). Sie beginnt mit der Berücksichtigung der Zuschlaggewinnung und der Verarbeitung zu Zuschlagstoffen. Ebenfalls eingeschlossen sind die Herstellung der weiteren Roh- und Hilfsstoffe und die Kalksandsteinproduktion selbst sowie die Herstellung und Verwertung von anteiligen Verpackungsmaterialien. Zudem liegt die Entsorgung anfallender Reststoffe innerhalb der Systemgrenze. Nutzungs- und Entsorgungsstadium der Steine sind in dieser Deklaration nicht berücksichtigt und müssen für eine Bewertung oder Vergleich im Kontext des Gebäudes ergänzt werden.

Abschneidekriterium:

Es wurden alle Daten aus der Betriebsdatenerhebung, d.h. alle nach Rezeptur eingesetzten Ausgangsstoffe, die eingesetzte thermische Energie, der interne Kraftstoffverbrauch sowie der Stromverbrauch, alle direkten Produktionsabfälle sowie alle zur Verfügung stehenden Emissionsmessungen in der Bilanzierung berücksichtigt. Für alle berücksichtigten In- und Outputs wurden Annahmen zu den Transportaufwendungen getroffen. Damit wurden auch Stoff- und Energieströme mit einem Anteil von kleiner als 1 Prozent berücksichtigt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Summe der vernachlässigten Prozesse 5% der Wirkkategorien nicht übersteigt. In der Herstellung benötigte Maschinen, Anlagen und Infrastruktur werden vernachlässigt.

Transporte:

Transporte in den Vorketten wurden berücksichtigt. Die Transportdistanzen der Zuschläge und Bindemittel vom Ort der Vorproduktion zum Herstellwerk der Kalksandsteine variieren zwischen rund 10 km und 200 km. Transporte zur Baustelle wurden nicht berücksichtigt.

Betrachtungszeitraum:

Die Datengrundlage der vorliegenden Ökobilanz beruht auf aktuellen Datenaufnahmen in Werken des Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. aus dem Jahr 2008 für die Rezepturen und den Werksbetrieb.

Hintergrunddaten:

Zur Modellierung des Lebenszyklus für die Herstellung von Kalksandsteinen wurde das von der PE International entwickelte Software-System zur Ganzheitlichen Bilanzierung "GaBi 4" eingesetzt [7]. Alle für die Kalksandsteinherstellung relevanten Hintergrund-Datensätze wurden der Datenbank der Software GaBi 4 entnommen oder vom Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. zur Verfügung gestellt. Alle maßgeblichen Datensätze im Zusammenhang mit der Herstellung von Kalksandsteinen, wie der Strom-Mix (DE), eingesetzte Energieträger sowie die Herstellung von Branntkalk, sind in der GaBi 4 Dokumentation zu finden [8].

Datenqualität:

Die Datengrundlage der vorliegenden Ökobilanz beruht auf aktuellen Datenaufnahmen aus dem Jahr 2008 für die Rezepturen und den Werksbetrieb. Dabei handelt es sich um repräsentative Werksdaten, die von den einzelnen Kalksandstein-Unternehmen zur Verfügung gestellt wurden.

Allokation:

Für die Herstellung der genannten Produkte wurden Produktionsdaten aus 49 Werken zur Verfügung gestellt. Für die Zuordnung der produktspezifischen Aufwendungen wurden die Brennstoffe, die nötig sind um den Dampferzeuger zu betreiben, sowie Verpackungsmaterialien nach produziertem Volumen zugeordnet. Beim Autoklav ist das Volumen der begrenzende Parameter. Ebenso ist bei den Anteilen der Verpackungsmaterialien das Volumen der Produkte maßgebend. Strom- und Dieselbedarf sowie nicht direkt zuordenbare Rohstoffe wurden nach Masse zugeordnet. Die Mittelwertbildung der Werksdaten basiert auf der Wichtung über die Produktionsmenge.

Gutschriften infolge der thermischen Verwertung der Verpackungsmaterialien (Paletten, Folie) wurden in der Bilanz berücksichtigt. Es erfolgt hierbei nach der Methode der einfachen Gutschrift eine Gutschrift für DE: Strom Mix und DE: Dampf aus Erdgas (Hauptenergieträger), resultierend aus der Verbrennung von Paletten und Folie in einer MVA. Altöl wird ebenfalls in einer MVA entsorgt. Hieraus resultieren keine Gutschriften. Das Holz der Paletten wird als CO₂-neutral angesehen. Es wird davon ausgegangen, dass bei deren thermischer Verwertung kein CO₂ freigesetzt wird, da ebenso keine Berücksichtigung der CO₂-Einbindung in der Produktionsphase (beim Wachstum der Biomasse) berücksichtigt wurde.

Beim Vergleich der betrachteten Werke hat sich gezeigt, dass sich das grundsätzliche Ablaufschema im Prinzip stets wiederholt und immer in etwa gleich ist. In allen Fällen werden die wesentlichen Energiemengen in den Kalksandsteinwerken über Wasser- und Dampfleitungen transportiert. Hier liegen bzgl. der prinzipiellen Stoffstrom- und Energieführung der im Hinblick auf den Energieverbrauch praktisch kaum Unterschiede vor. Der energietechnisch relevante Aufbau der untersuchten Kalksandsteinwerke, und auch letztendlich aller anderen Kalksandsteinwerken gestaltet sich mit mehr oder weniger geringen Abweichungen wie im Folgenden als globale Anlagenbeschreibung wiedergegeben:

- a) In allen betrachteten Kalksandsteinwerken wird das Rohwasser mittels Brunnenanlagen (1. oder 2. Grundwasserleiter) gewonnen und durchläuft als erstes die Wasseraufbereitungsanlage. Die Temperatur des anstehenden Brunnenwassers beträgt etwa $T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Grundwasser ist im Allgemeinen relativ arm an mechanischen Verunreinigungen ist. Es enthält jedoch oft erhebliche Mengen an überschüssiger Kohlensäure, Kieselsäure sowie Eisen- und Manganverbindungen. Der Sauerstoffgehalt liegt in der Regel niedrig. Die chemische Beschaffenheit des Wassers ist in erster Linie davon abhängig, welchen Boden das Wasser durchflossen hat (Kalk-, Gips- bzw. Salz haltige Böden). So können in Mooregebieten noch organische Substanzen (Huminstoffe) als relevante Inhaltsstoffe hinzukommen.
- b) Als weitere Quelle dient das bei der Dampfhärtung stets anfallende Härtekesselkondensat, das in mehreren Fällen als Zusatz zum Mischwasser verwendet wird und eine energieeinsparnde Wirkung hat. In manchen Fällen wird das Kondensat ohne weitere Nutzung verworfen. Die Temperatur des Härtekesselkondensats liegt etwa im Bereich von $T = 60$ bis $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Es liegen aufgrund von Qualitätsanforderungen an die Kalk-Sand-Rohmischung jedoch Grenzen für die Anwendung des Härtekesselkondensats vor
 - limitierte Menge aufgrund der chemischen Zusammensetzung (Salzgehalt)
 - maximal zulässige Temperatur $t_{\text{max}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.
- c) Da die meisten Rohwässer Stoffe enthalten, die zu Ablagerungen und Korrosion im Dampferzeuger und den Rohrleitungssystemen führen können, sind sie im unaufbereiteten Zustand für die Speisung von Dampfkesseln ungeeignet und müssen einer Aufbereitung unterzogen werden. Die Wasseraufbereitungsanlagen bestehen im Wesentlichen aus den gleichen nacheinandergeschalteten Komponenten: Kiesfilter, Entsäuerung, Enteisung und Entmanganung, Entcarbonisierung mittels Ionenaustauscher, Enthärtung, thermische Entgasung. Der Energieverbrauch für diese Anlagenteile ist vergleichsweise gering und wurde deshalb vernachlässigt.
- d) Als nächstes wird das aufbereitete Wasser mittels Speisewasserpumpen dem Dampferzeuger zugeführt und auf dem Weg dort hin mit Hilfe von Wärmetauschern unter Ausnutzung des Wärmeenergieinhaltes der Kondensatabwassers und mit Hilfe von Economizern auf Temperaturen von $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ bis zu maximal $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt. Hier liegt der derzeitige Schwerpunkt der Wärmerückgewinnung in den Kalksandsteinwerken. In den betrachteten Werken ist die Situation jedoch vergleichsweise unterschiedlich. Dies betrifft die Anzahl und Anordnung der Wärmetauscher und die Auslegungstemperaturen der Economizer, sofern vorhanden.

- e) Beim nächsten Verfahrensschritt, der Dampfhärtung, unterscheiden sich die betrachteten Werke hinsichtlich der jeweiligen Produktion und der Fahrweise der Härtekessel. Manche Werke betreiben automatische Dampfsteuerungsanlagen der Anbieter, mit denen die Dampflogistik jedoch nicht nur mit Blick auf die Energieeinsparung, sondern auch im Schwerpunkt auch auf eine Optimierung produktionstechnischer Belange ausgelegt ist.
- f) Hinzu kommt, dass in den meisten Produktionsstätten immer sog. "reguläre Härtekurven" mit definierten Aufheiz-, Halte- und Entspannungszeiten und in anderen - je nach veränderlichem Produktionsplan - die sog. "Restdampf Härtekurven" gefahren werden. Bei den Restdampfkurven werden die Autoklaven innerhalb einer definierten Zeit auf die vorgesehene Maximaltemperatur ($T \approx 200 \text{ }^\circ\text{C}$) aufgeheizt und dann für eine vergleichsweise kurze Zeit bei dieser Temperatur gehalten ($t_h \approx 1$ bis 2 h). Anschließend wird der Härtekessel druckdicht verschlossen und kühlt über Nacht bzw. über das Wochenende langsam aus. In beiden Fällen ist die Steinqualität einwandfrei. Manche Betriebe nutzen beide Fahrweisen und wechseln - je nach Tagesablauf - sporadisch. In den begangenen Kalksandsteinwerken wird jedoch nicht immer aufgezeichnet, welche Härtekurven angesetzt werden, so dass nicht immer eine genaue Verknüpfung der Fahrweise mit dem Energieverbrauch möglich ist.

Bild 3.1 zeigt ein vereinfachtes Fließschema in den Kalksandsteinwerken.

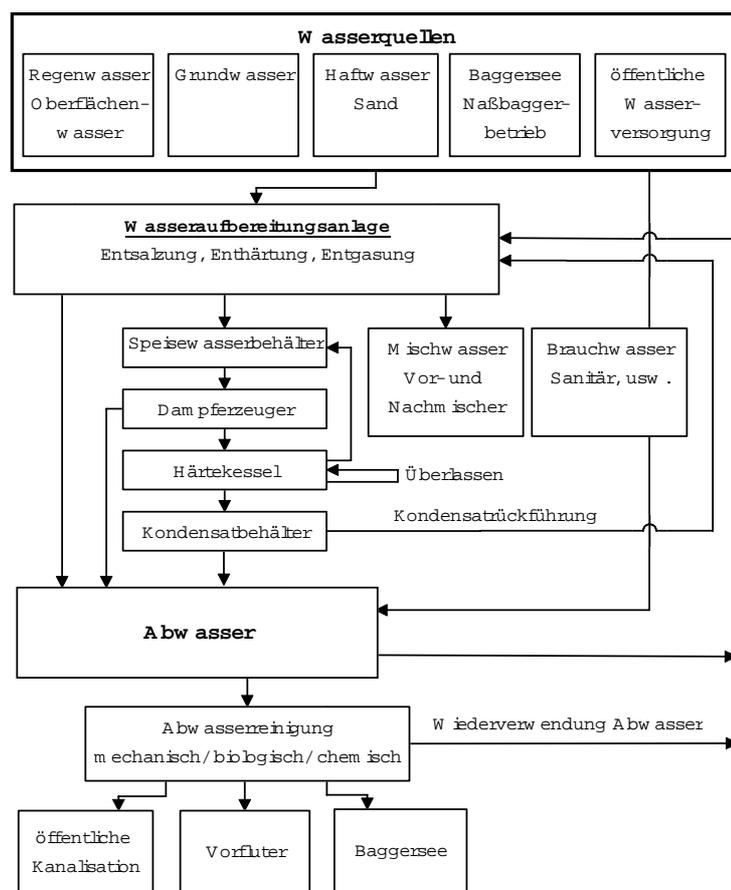
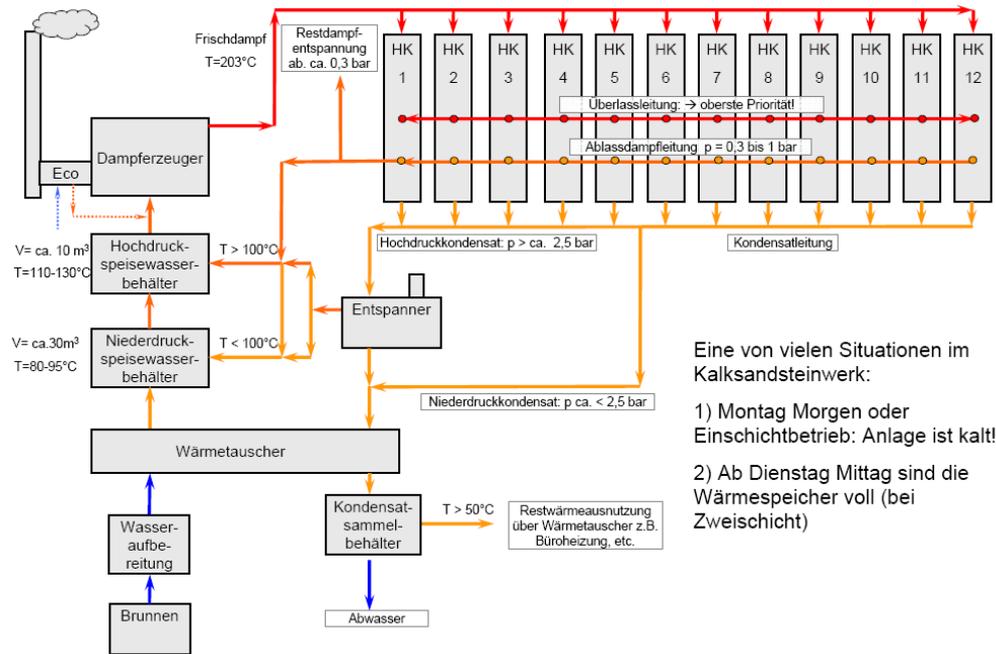


Bild .31: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk

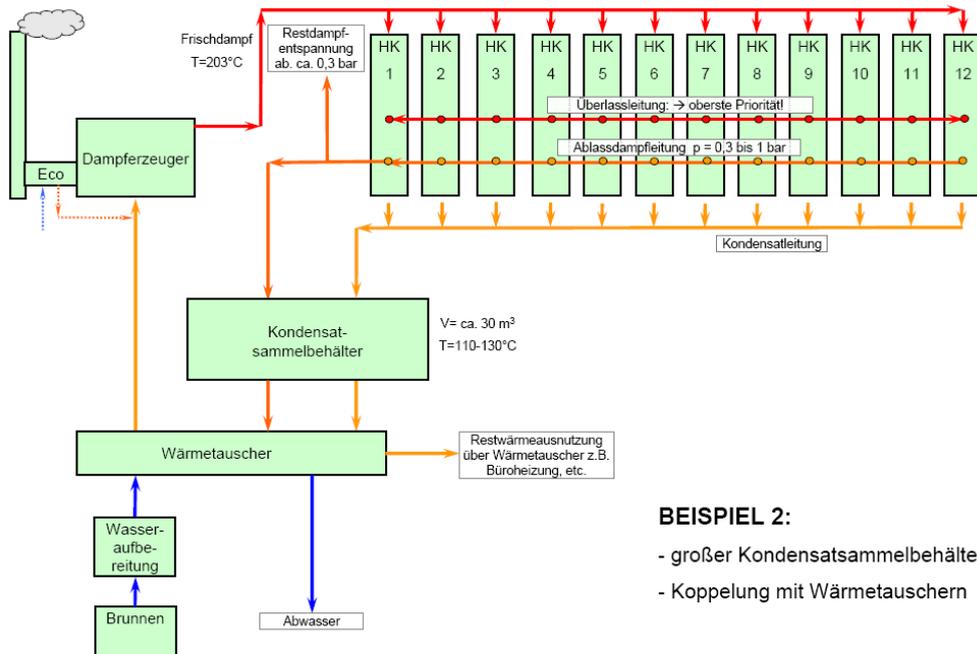
Die Bilder 3.2 bis 3.9 zeigen schematisch Kalksandstein-Härteanlagen und auch neue Messeinrichtungen in den betrachteten Werken.



Eine von vielen Situationen im Kalksandsteinwerk:

- 1) Montag Morgen oder Einschichtbetrieb: Anlage ist kalt!
- 2) Ab Dienstag Mittag sind die Wärmespeicher voll (bei Zweischicht)

Bild 3.2: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk (Beispiel 1)



BEISPIEL 2:

- großer Kondensatsammelbehälter
- Koppelung mit Wärmetauschern

Bild 3.3: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk (Beispiel 2)

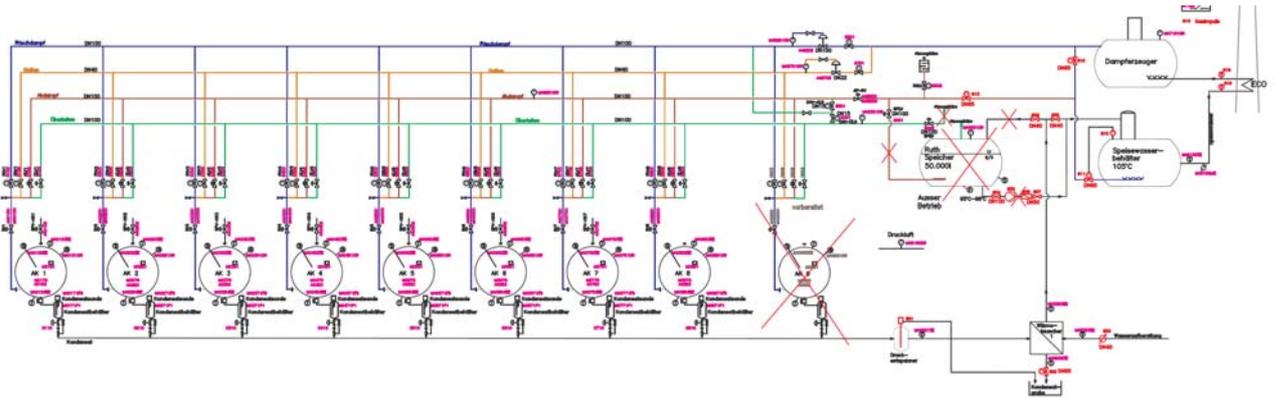


Bild 3.4: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk (Beispiel 3)

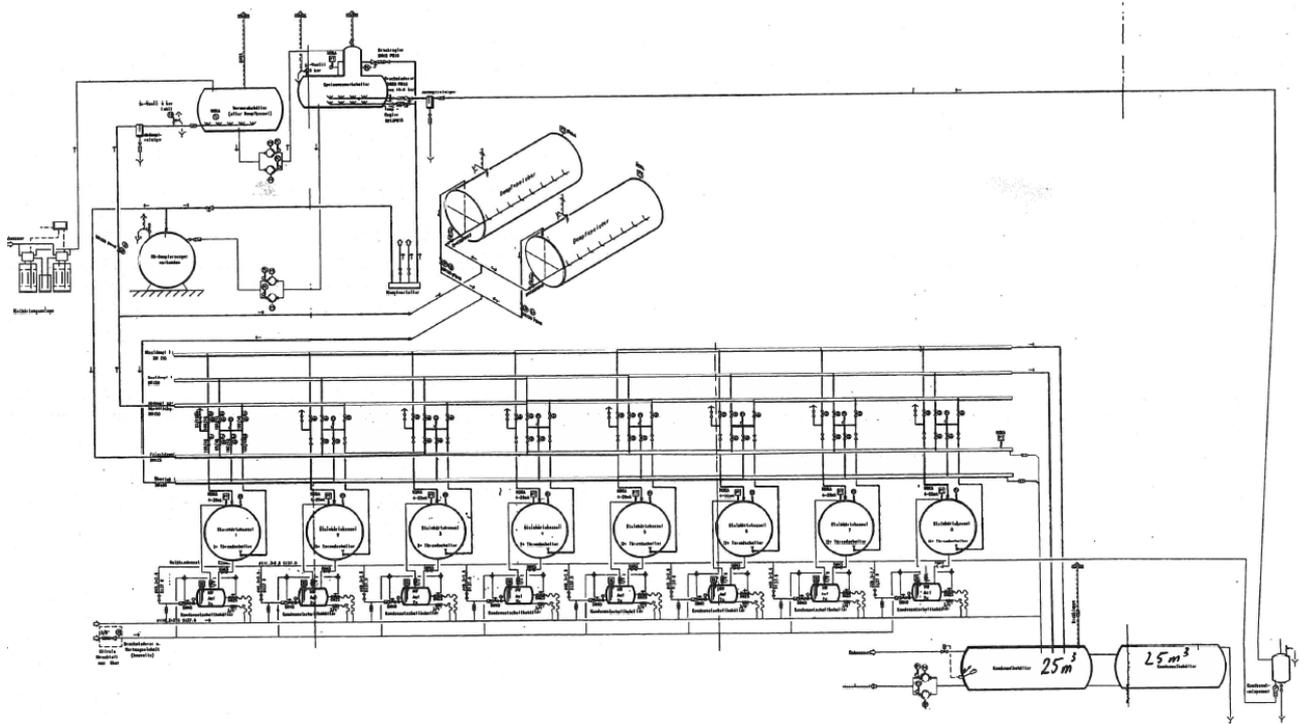


Bild 3.5: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk (Beispiel 4)

Berechnungen zur Bestimmung des Volumen der Rohrleitungs Werk 4

		D	D/2	A	Länge	Volumen
		m	m	m ²	m	m ³
Frischdampfleitung	DN 125	0,125	0,0625	0,012	86	1,055
Überlassleitung 1	DN 150	0,150	0,075	0,018	80	1,413
Überlassleitung 2	DN 150	0,150	0,075	0,018	80	1,413
Restdampfleitung 1	DN 150	0,150	0,075	0,018	60	1,060
Restdampfleitung 2	DN 200	0,200	0,1	0,031	60	1,884
Dampfspeicherezuleitung 1	DN 150	0,150	0,075	0,018	80	1,413
Dampfspeicherezuleitung 2	DN 150	0,150	0,075	0,018	80	1,413
Summe						9,651

Eden 28.05.2010

Bild 3.5: Berechnung des Rohrleitungsvolumens zum Werk 4

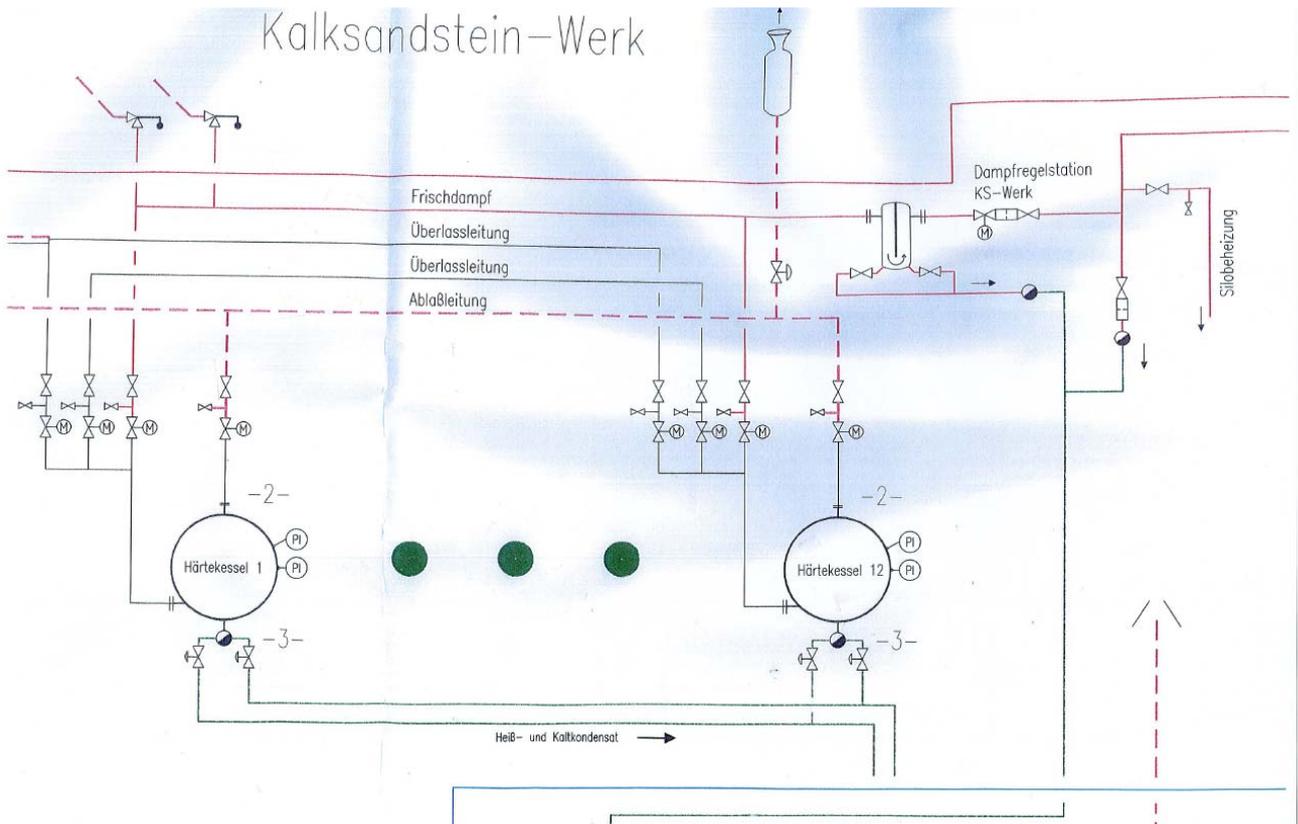


Bild 3.7: Fließschema Wasser- und Dampfströme im Kalksandsteinwerk (Beispiel 5)

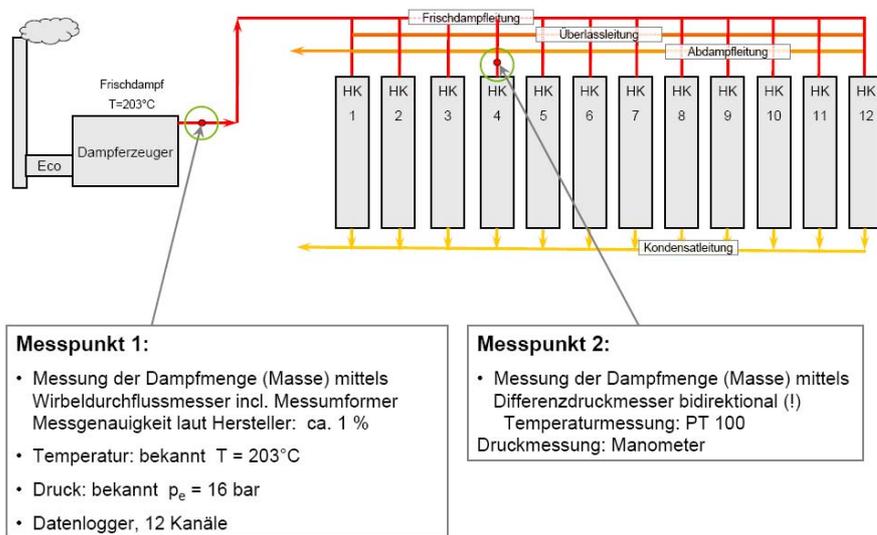


Bild 3.8: Beispiel für eine Messeinrichtung zur Erfassung der Energiedaten in einem der betrachteten Kalksandsteinwerke

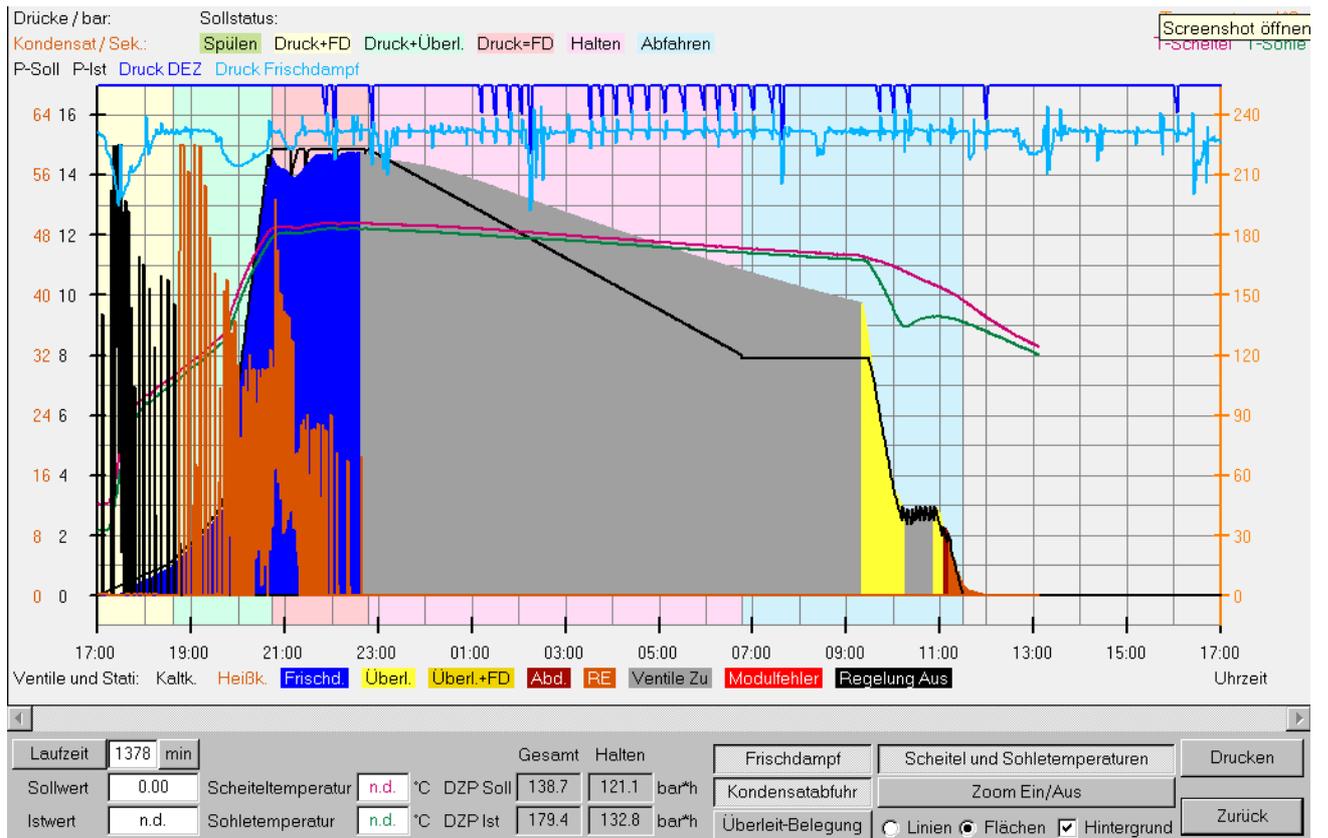


Bild 3.9: Reale Autoklavenreise - Komplexität der Temperatur- und Druckverläufe

3.2 Energieverbrauchsdaten aus Kalksandsteinwerken

Allgemeines

Insgesamt waren bei den Verbräuchen Schwankungen in unterschiedlicher Höhe festzustellen. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Werke zwar hinsichtlich der Energieströme zwar prinzipiell gleiche Abläufe aufweisen, für die Unterschiede wurden im Verlauf des Projektes jedoch vielfältige Ursachen festgestellt. Der Anlagenbestand und die Fahrweise in den KS-Werken sind vergleichsweise heterogen. Die meisten Einflussgrößen kommen zudem auch noch gleichzeitig vor so dass zusätzlich Wechselwirkungen auftreten. So unterscheiden sich die Werke in folgenden energieverbrauchsrelevanten Punkten:

- Fahrweise (ein-, zwei- oder dreischichtig), je geringer die Werksauslastung ist, desto höher ist der Energieverbrauch pro Tonne Kalksandsteinmaterial
- Bestand der technischen Anlage (Wirkungsgrad der Wärmedämmung der Kessel und Rohrleitungssysteme, Dichtigkeit)
- Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage (Anzahl und Art der Wärmetauscher, Zustand der Aggregate, Alter)
- Verwendung von Härtekesselkondensat als Mischwasser (ja/nein und Temperatur)
- Betrieb einer automatischen Dampfsteuerungsanlage
- Wirkung tages- und jahreszeitlicher Außentemperaturschwankungen
- Art der Härtekurve (reguläre Kurven oder Restdampfkurven)
- Auftreten technischer Störungen
- Unterschiedliche Be- und Entladungszeiten

Messzähler zur Erfassung der Verbrauchsdaten (Stromzähler, Dampfmengenzähler, etc.) sind an den Einzelaggregaten (Mischer Reaktoren, Pressen, Förderbänder, Dampferzeuger, Härtekessel, etc) bislang kaum vorhanden. In fast allen Fällen gibt es lediglich einen Gesamtstromzähler.

Bei der Sichtung der energierelevanten Daten während der Begehungen in den Kalksandsteinwerken stellte sich heraus, dass die Zusammenhänge zwischen dem Anlagenaufbau, dem Anlagenzustand, der Fahrweise und dem spezifischen Energieverbrauch (kW/t) nicht direkt erkennbar sind. Insgesamt liegen zu viele Einflussgrößen und Wechselwirkungen vor, so dass man aus den einzelnen Informationen nicht direkt und sicher Schlussfolgerungen ziehen kann. Es lagen von Werk zu Werk keine vergleichbaren Situationen vor, so dass einzelne Einflussgrößen in keinem Fall isoliert betrachtet werden konnten. Dies war zum Zeitpunkt der Antragsstellung nicht erkennbar.

Dies verdeutlicht auch folgende Erkenntnis zum Stromverbrauch, was aus den Werksbegehungen und den verschiedenen Betriebsleiterbefragungen hervorging: Ein Kalksandsteinwerk verbraucht umso mehr Strom, je moderner es ausgelegt ist. Dieses zunächst als paradox erscheinende Phänomen erklärt sich zum einen durch gestiegene Qualitätsanforderungen an die Steine, die den Stromverbrauch überproportional zur Produktionsmenge wachsen lassen. So werden für neuere Produkte wie z. B. Plansteine mit sehr hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit in aller Regel moderne, mehr Strom verbrauchende hydraulische Pressen eingesetzt. Bei diesen Pressen ist dagegen der Verschleiß an Formwerkzeugen geringer, wodurch die Abfallmenge sinkt. Mehr Strom verlangt ebenfalls der Einsatz moderner Aufbereitungs- und Antriebstechnik, der jedoch wiederum dazu beiträgt, den Rohstoff- und Energieverbrauch zu optimieren.

Wochengang des Energieverbrauchs

Im Folgenden werden die im Rahmen dieses Projektes erhobenen Energieverbrauchsdaten aus mehreren Kalksandsteinwerken wiedergegeben. Die Daten beziehen sich dabei auf Wochen, Monate oder ein ganzes Jahr. In manchen Fällen ist noch zu beachten, dass die Fakturierung der produzierten Steinmengen erst am jeweiligen Montag nach der betrachteten Produktionswoche erfolgt, so dass noch eine Bereinigung der Verbrauchsdaten erfolgen muss.

Werk 1: Einfluss des Wochengangs

Das nachfolgende Bild 3.10 zeigt für ein Kalksandsteinwerk exemplarisch den typischen Wochengang zum Zusammenhang zwischen der Produktionsmenge und dem Energieverbrauch. Wie erwartet, ist sehr deutlich zu erkennen, dass der Energieverbrauch pro Tonne Kalksandsteinmaterial zum Wochenbeginn, d.h. wenn die Produktionsanlage ausgekühlt ist, höher liegt als im Verlauf der Woche, wenn die Wärmerückgewinnung läuft. Ebenfalls ist zu erkennen, dass sich im Fall einer technischen Produktionsstörung (hier: Mittwoch der vierten Woche) und einer damit verbundenen Reduzierung der Herstellmenge der spezifische Energieverbrauch sofort deutlich ansteigt.

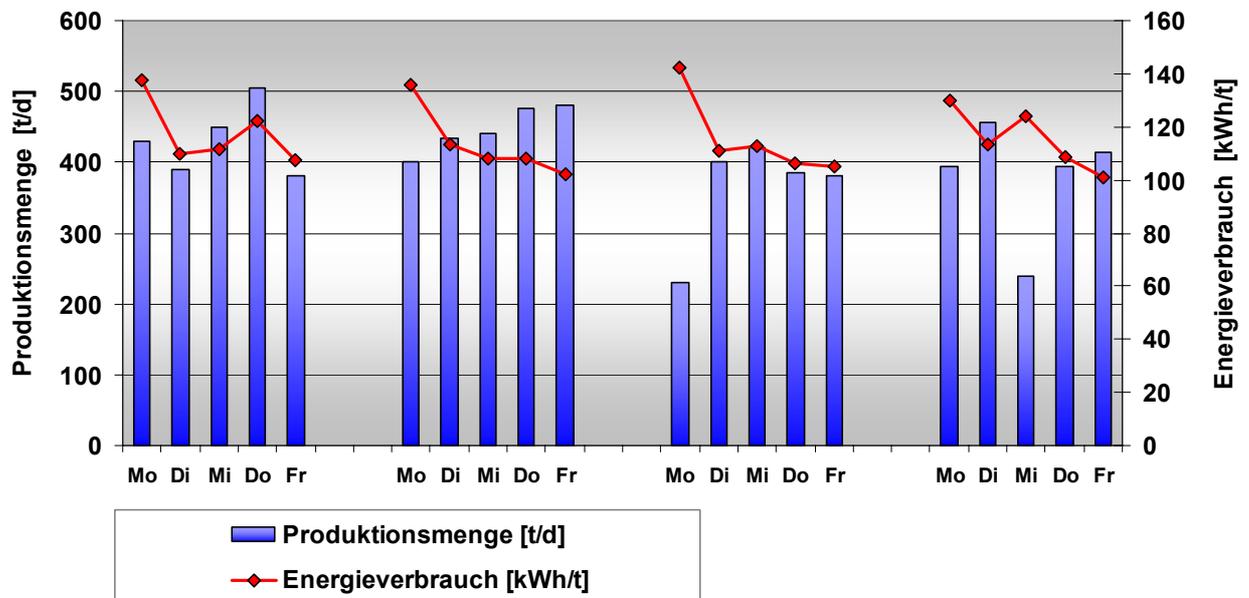


Bild 3.10: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 1

Werk 2: Einfluss der Rohlingstemperatur

Deutlich erkennbar ist auch der Einfluss der Temperatur der Rohlinge vor dem Autoklavieren auf den spezifischen Energieverbrauch. Das folgende Beispiel zeigt: Je höher die Rohlingstemperatur aufgrund der höheren Außenlufttemperatur $T_{\max\emptyset} = 16,0 \text{ °C}$ statt $T_{\max\emptyset} = 4,6 \text{ °C}$ ist, desto geringer ist der spezifische Energieverbrauch. Eine Erhöhung der Rohlingstemperatur von $T = 31 \text{ °C}$ um $\Delta T = 9 \text{ °C}$ auf $T = 40 \text{ °C}$ führt für den betrachteten Zeitraum von zwei Wochen bereits z.B. zu einer mittleren Reduzierung von $P = 94,3$ auf $81,8 \text{ kWh/t}$ zu einer Energieeinsparung von $\Delta P = 12,5 \text{ kWh}$ pro Tonne Kalksandsteinmaterial. Der vergleichsweise hohe Bedarf für die Produktion am Montag aufgrund der am Wochenende ausgekühlten Produktionsanlage ist ebenfalls deutlich erkennbar. Siehe Bild 3.11.

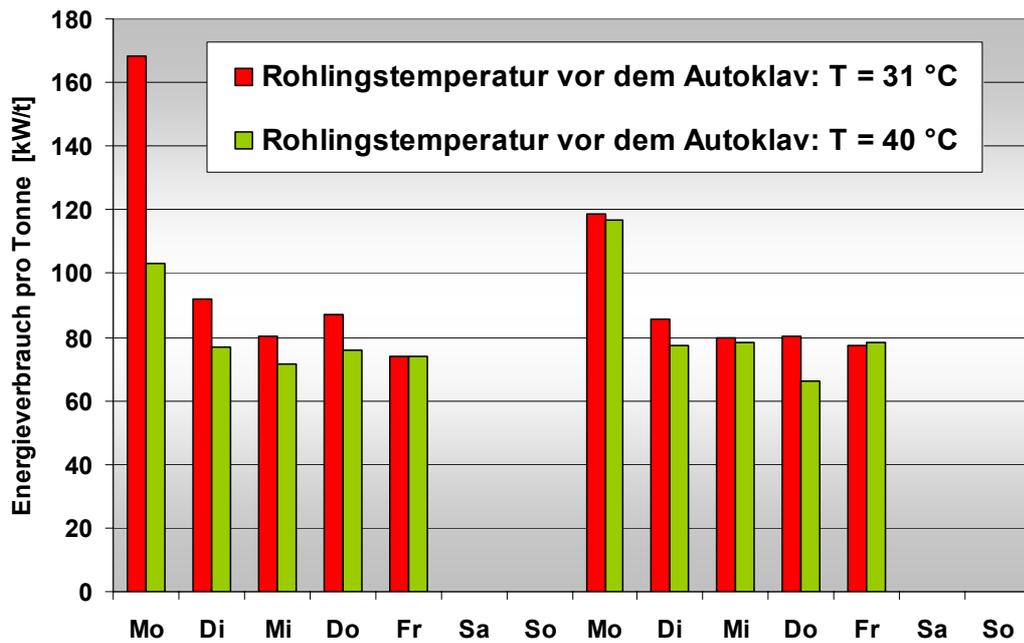


Bild 3.11: Wochengang des Energieverbrauchs - Werk 2

Werke 3 bis 5: Wochengang - Mittelwerte aus einem Produktionsjahr

Das nachfolgende Bild 3.12 zeigt vergleichend den Wochengang des Energieverbrauchs aus 3 Kalksandsteinwerken. Auch hier ist der vergleichsweise hohe Energieverbrauch am jeweiligen Montag und die Abnahme zur Wochenmitte deutlich zu erkennen.

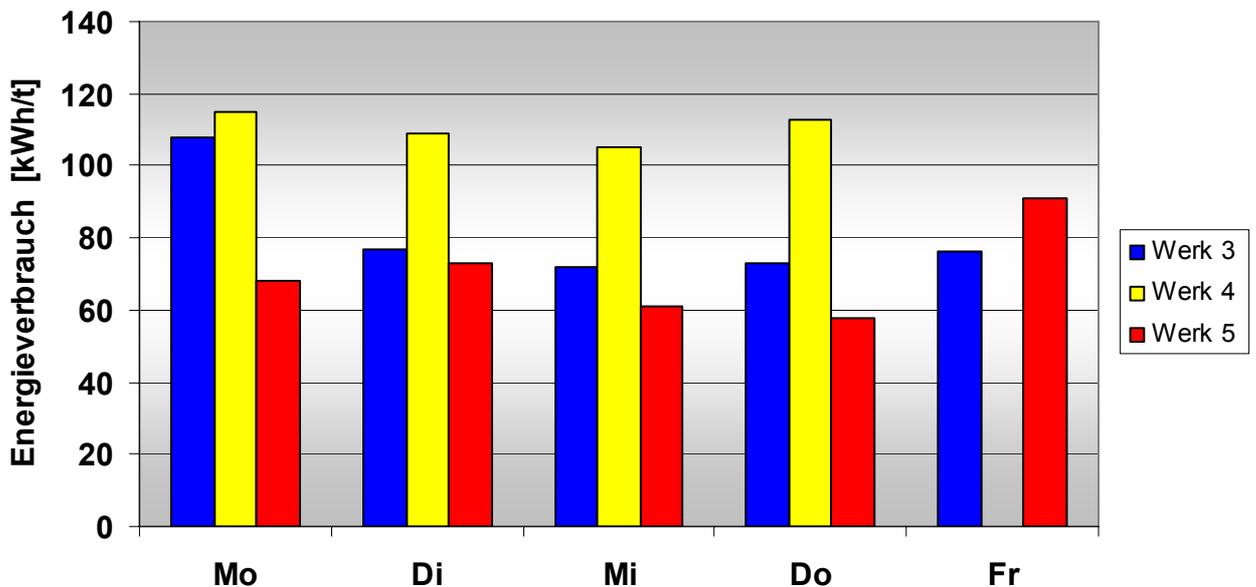


Bild 3.12: Wochengang des Energieverbrauchs - Werke 3 bis 5
Mittelwerte aus der Produktion eines ganzen Jahres

Werk 6: Einfluss des Wochengangs

Auch beim nachfolgenden Beispiel aus Werk 6 ist der vergleichsweise hohe Bedarf für die Produktion am Montag bzw. Dienstag (rot) aufgrund der am Wochenende ausgekühlten Produktionsanlage ist und die Abnahme zur Wochenmitte deutlich erkennbar, siehe Bild 3.13.

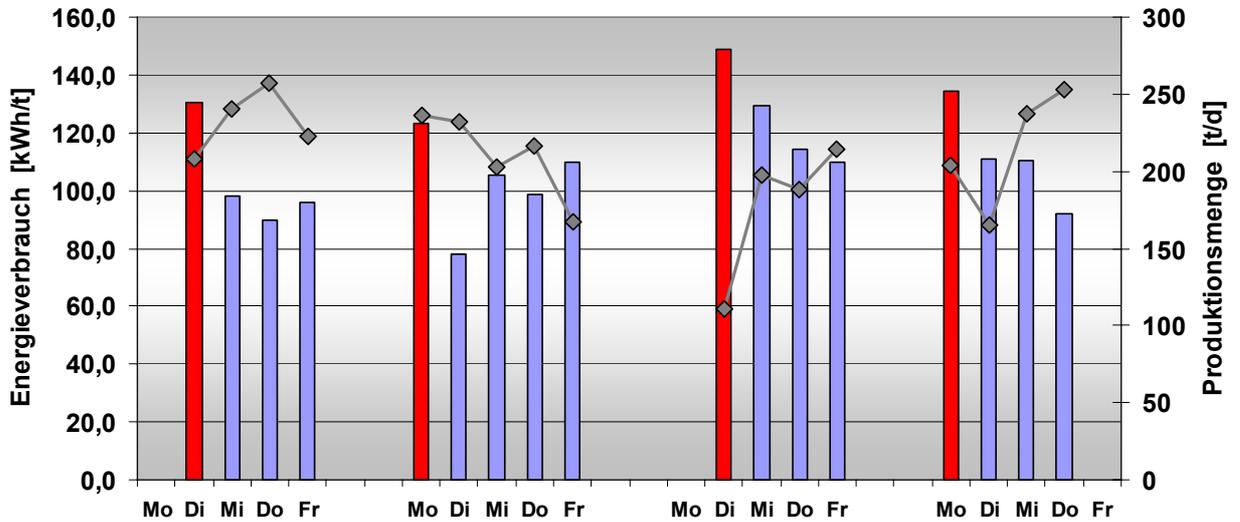


Bild 3.13: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 6

Werk 7: Einfluss des Wochengangs

Auch beim nachfolgenden Beispiel aus Werk 7 ist der vergleichsweise hohe Bedarf für die Produktion am Montag und Freitag (rot) aufgrund der am Wochenende ausgekühlten Produktionsanlage ist und die Abnahme zur Wochenmitte deutlich erkennbar, siehe Bild 3.14.

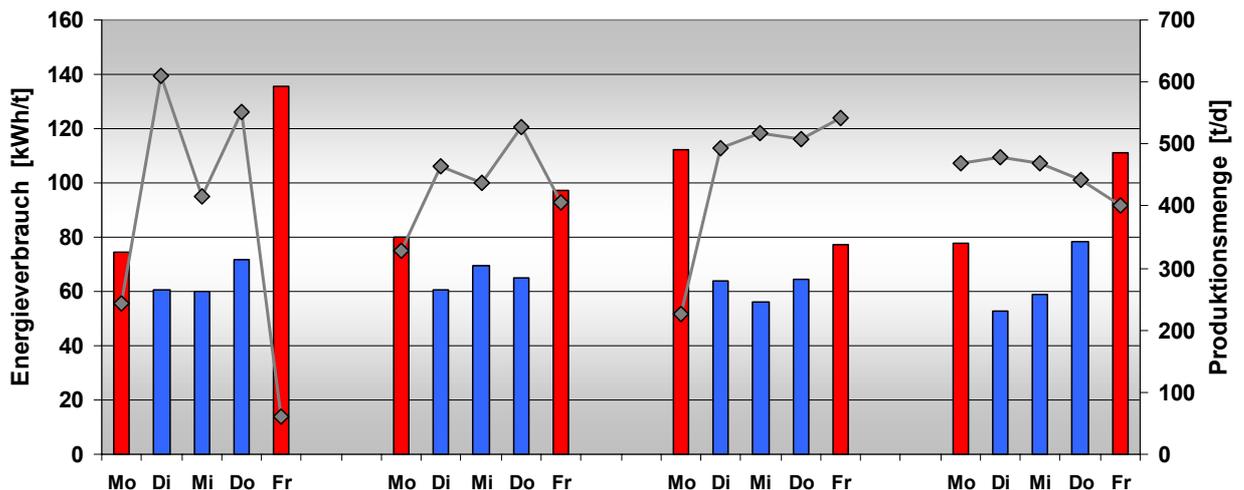


Bild 3.14: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs - Werk 7

Werk 8: Einfluss des Wochengangs

Eine weitergehende Auswertung von Daten des Werkes 7 bestätigen diesen Zusammenhang, siehe Bild 3.15. Der minimaler Tageswert liegt bei 52.6 kWh/t, der maximale Tageswert liegt bei 110 kWh/t, der mittlere spezifische Verbrauch der gesamten Woche liegt bei 72.2 kWh/t und die mittlerer spezifische Verbrauch im Zeitraum von Dienstag bis Donnerstag liegt auf einem geringeren Niveau bei 64.4 kWh/t. Das arithmetisches Mittel des spezifischen Verbrauchs für einzelne Wochentage, ermittelt aus Angaben über Energieverbrauch und Produktion beträgt 61 kWh/t, Wert für Mittwoch (relative Werte).

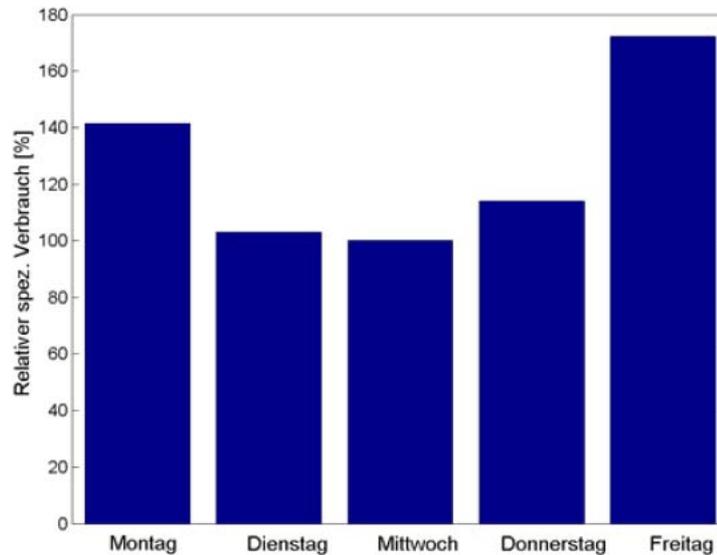


Bild 3.15: Wochengang der Produktionsmenge und des Energieverbrauchs (relative Werte) Werk 8

Das arithmetisches Mittel des spezifischen Verbrauchs in diesem betrachteten Werk für einzelne Wochentage, ermittelt aus Angaben über Energieverbrauch und Produktion im September 2008 ist im nachfolgenden Bild 3.16 zu sehen. Dargestellt sind relative Werte, bezogen auf den Wert für den oben betrachteten Mittwoch (Produktionsmenge: $m = 460$ t).

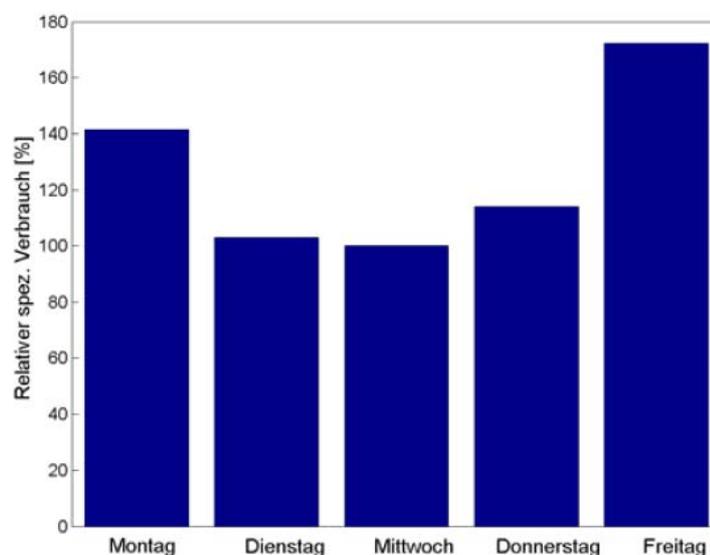


Bild 3.16: Arithmetisches Mittel des spezifischen Verbrauchs für die einzelnen Wochentage (relative Werte) - Werk 8

Erwartungsgemäß ist der spezifische Verbrauch montags höher als Dienstag bis Donnerstag. Der deutlich höchste spezifische Verbrauch tritt jedoch am Freitag auf, die produzierte Menge ist allerdings freitags höher als montags. Auffällig ist, dass die Energieeffizienz mittwochs am höchsten ist, obwohl am Dienstag und donnerstags die produzierte Menge höher ist. Minimaler und maximaler Tageswert treten in der gleichen Woche auf. Die Ursache dafür ist aufgrund mangelnder Datenlage nicht bekannt.

Sehr aufschlussreich ist auch die Betrachtung des monatlichen Verlauf des spezifischen Energieverbrauchs im Zusammenhang mit der Produktionsmenge. Der minimaler Wert liegt bei $P = 65,6 \text{ kWh/t}$ (Juli) und der maximale Wert bei $P = 95,45 \text{ kWh/t}$ (November). Das arithmetische Mittel des Verbrauchs im Zeitraum Juli bis September liegt bei $P = 70,4 \text{ kWh/t}$ und das arithmetische Mittel des Verbrauchs im Zeitraum Juli bis November liegt mit einem Wert von $P = 75,5 \text{ kWh/t}$ erkennbar höher, siehe Bild 3.17.

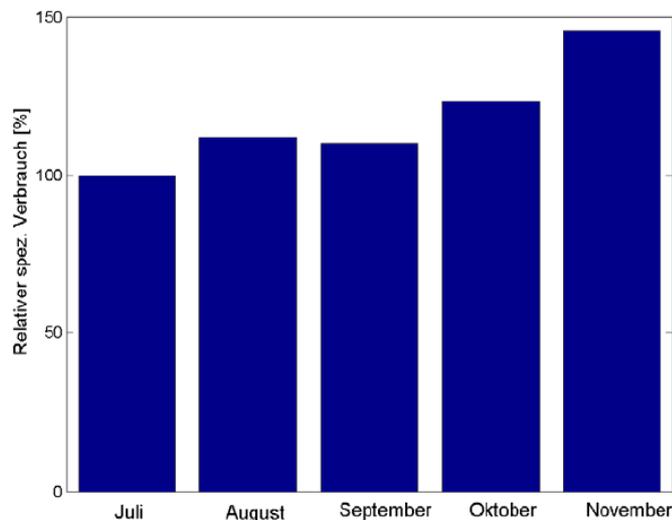


Bild 3.17: Relativer massenspezifischer Verbrauch für die Monate Juli bis November, bezogen auf Wert für Juli ($P = 65,6 \text{ kWh/t}$) - Werk 8

Das nachfolgende Bild 3.18 zeigt dazu die relative Produktion für die Monate Juli bis November, bezogen auf Wert für Juli für eine Produktionsmenge 9.310 t.

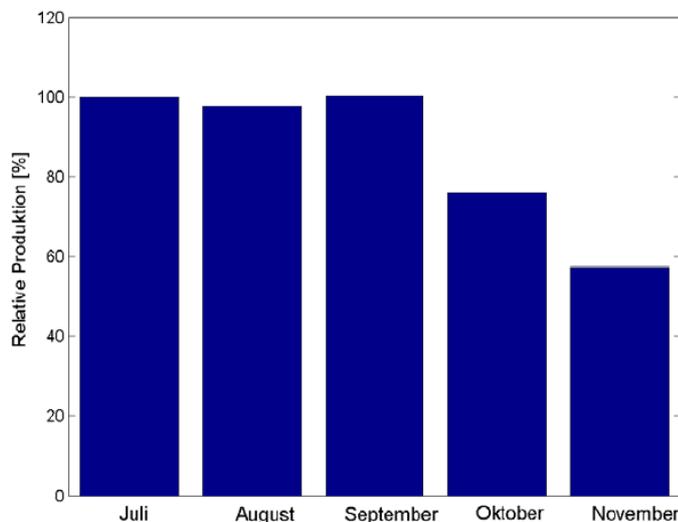


Bild 3.18: Relative Produktion für die Monate Juli bis November, bezogen auf Wert für Juli Werk 8

Interessant ist auch ein Vergleich einzelner Kerntage in der Woche. Es werden drei Beispiele aufgeführt.

Beispiel 1: Vergleich 23.9.2008 mit 25.9.2008

Bei gleicher Anzahl an Härtekesselreisen wird bei 8% Unterschied in der produzierten Masse am 25.9.2008 spezifisch 50% mehr Energie benötigt

Tag	Produzierte KS-Masse [t]	kWh/t	Anzahl Reisen	Formate
Di, 23.09.2008	479.10	52.65	7	3* 15 Q 200 - Q 240 1* 10 EG 240 3*14 Q 115 - Q 175
Do, 25.09.2008	441.20	78.06	7	5* 15 Q 200 - Q 240 1* 10 EG 240 1* 04 6DF - 8DFN

Tabelle 3.1: Beispiel 1 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8

Beispiel 2: Vergleich 16.9.2008 mit 23.9.2008

Am 16.9.2008 wird eine Härtekesselreise mehr durchgeführt als am 23.09.2008, bei 3% Unterschied in der produzierten Masse werden am 23.9.2008 dann 21% mehr Energie benötigt

Tag	Produzierte KS-Masse [t]	kWh/t	Anzahl Reisen	Formate
Di, 16.09.2008	493.82	63.87	8 61.7	4* 14 Q 115 - Q 175 3* 10 EG 240 1* 12 Q Halbe 1
Di, 23.09.2008	479.10	52.65	7 68.4	3* 15 Q 200 - Q 240 1* 10 EG 240 3* 14 Q 115 - Q 175

Tabelle 3.2: Beispiel 2 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8

Beispiel 3: Vergleich 17.9.2008 mit 18.9.2008

Bei gleicher Anzahl der Härtekesselreisen werden bei 2% Unterschied in der produzierten Masse werden am 18.9.2008 15% mehr Energie benötigt

Tag	Produzierte KS-Masse [t]	kWh/t	Anzahl Reisen	Formate
Mi, 17.09.2008	518.34	56.17	8	3*14 Q 115 - Q 175 2* 10 EG 240 2* 12 Q Halbe 1 1* 05 6DF - 8DFN
Do, 18.09.2008	507.87	64.29	8	2* 15 Q 200 - Q 240 3* 14 Q 115 - Q 175 2* 12 Q Halbe 1 1* 05 6DF - 8DFN

Tabelle 3.3: Beispiel 3 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8

Beispiel 3: Vergleich 17.9.2008 mit 18.9.2008

Bei gleicher Anzahl der Härtekesselreisen werden bei 2 % Unterschied in der produzierten Masse werden am 18.9.2008 15% mehr Energie benötigt

Tag	Produzierte KS-Masse [t]	kWh/t	Anzahl Reisen	Formate
Mi, 17.09.2008	518.34	56.17	8	3*14 Q 115 - Q 175 2* 10 EG 240 2* 12 Q Halbe 1 1* 05 6DF - 8DFN
Do, 18.09.2008	507.87	64.29	8	2* 15 Q 200 - Q 240 3* 14 Q 115 - Q 175 2* 12 Q Halbe 1 1* 05 6DF - 8DFN

Tabelle 3.4: Beispiel 3 zum Vergleich einzelnen Kalendertage - Werk 8

Im Hinblick auf die stark variierenden Werte für den spezifischen Energiebedarf bei einem einzelnen Werk ist nicht sicher, ob es sinnvoll ist, verschiedenen Werke auf Basis des spezifischen Energieverbrauchs miteinander zu vergleichen. Sicherlich spielt dabei die Auslastung eine wesentliche Rolle. Im Hinblick auf mittelfristige Verbesserungen der Energieeffizienz ist es ebenfalls sinnvoll, sich darauf zu konzentrieren, wie in einem Werk die Effizienzwankungen im Wochenrhythmus bzw. Jahresrhythmus reduzieren könnte. Die erforderlichen Maßnahmen dafür sind hier hauptsächlich organisatorischer Natur. Beispielsweise wird es sinnvoll sein, die Produktion pro Woche möglichst auf wenige direkt aufeinander folgende Tage zu konzentrieren, statt die Produktion auf alle Werkstage der Woche zu verteilen. Das Verbesserungspotenzial ist zwar begrenzt, der Kostenaufwand dürfte sich aber auch im Rahmen halten.

Des Weiteren wurden in 3 Kalksandsteinwerken Energiedaten aus dem Jahre 2009 analysiert und untereinander verglichen. Die Korrelationsuntersuchungen zum vermuteten Zusammenhang zwischen der Anzahl der eingesetzten Härtekessel und dem Energieverbrauch haben zu keiner befriedigenden Korrelation geführt, siehe Anhang, Bilder A1 bis A4.

Aufgrund der im Verlauf der Untersuchungen festgestellten breiten Streuungen lassen sich insgesamt lediglich tendenzielle Aussagen ableiten, weshalb im weiteren Fortgang des Projektes die Erfassungstiefe in den anschließenden Werken entsprechend reduziert wurde.

Erkennbare Einflussgrößen:

Immerhin sind folgende Einflussgrößen recht gut erkennbar:

- Einfluss des Wochengangs (höherer Verbrauch zum Wochenbeginn bei ausgekühlter Anlage)
- Einfluss der Rohlingstemperatur (geringerer Verbrauch bei höherer Rohlingstemperatur)
- Jahreszeitliche Abhängigkeit, siehe Bild 3.18 zum Jahrgang für 3 Kalksandsteinwerke im Anhang
- Punktuelle Produktionsstörungen

Wichtung der Anlagenkomponenten bzgl. des Energieverbrauchs:

Des Weiteren zeigte sich im Verlauf der Analysen, dass bestimmte Anlagenteile lediglich einen nachrangigen oder quasi gar keinen merklichen Einfluss auf die Höhe des Energieverbrauchs haben und somit kaum Ansatzpunkte zur Reduzierung der Verbräuche bieten. Dies trifft zum Beispiel auf den Bereich der Rohstoffvorhaltung, den Mischer und den Reaktor sowie die weitgehend sogar weitgehend auch zum Teil auf die elektrisch betriebenen Kalksandsteinpressen zu. Die bzgl. des Energieverbrauchs relevanten Anlagenkomponenten sind eindeutig der Dampferzeuger und die Härtekessel sowie die Intensität der Wärmerückgewinnung.

In allen betrachteten Kalksandsteinwerken wird eine Wärmerückgewinnung betrieben. Dabei wird der Wärmeenergieinhalt des bei der Dampfhärtung anfallenden Härtekesselkondensats mittels Wärmetauscher genutzt, um das Speisewasser aus der Wasseraufbereitungsanlage vor der Dampferzeugung vorzuheizen. Messwerte zu Mengen (keine Wasserzähler) liegen jedoch nicht vor, so dass Temperaturmessungen allein nicht ausreichen.

Aus dieser komplexen Gemengelage ist dann in Zusammenarbeit mit der DLR das nachfolgend dargestellte Modell für die thermodynamischen Berechnungen festgelegt worden, mit dem das energetische Hauptgeschehen in Kalksandsteinwerken realistisch und zielführend beschreiben werden konnte, siehe auch Bild 4.1.

Überschlägige thermodynamische Berechnungen im Rahmen der Werksbegehungen:

Die Untersuchungen in Kalksandsteinwerken und die damit verbundenen thermodynamischen Kalkulationen haben zu folgendem Bild der Aufteilung der Energieströme geführt, die auch in etwa mit denen aus der älteren Literatur deckungsgleich sind:

Beispielrechnungen: Ausgehend von einer kalkulierten Dampfmenge von 7.000 kg für eine exemplarische Härtekesselfahrt mit ca. 60 Tonnen Kalksandsteinmaterial wird unter Zugrundelegung der gemessenen Temperaturen (IR-Thermometer) und der berechneten Stein- und Stahlmassen (aus den Konstruktionsplänen) sowie den Wasser- bzw. Dampfmenngen dem Härteprozess etwa eine Energiemenge von rd. 6.000 kWh (entspricht rd. 100 kWh/t) zugeführt, die sich etwa wie folgt aufteilt:

- Überlassdampf vom Spenderkessel: ca. 1.400 kWh (≈ 23 %)
 - Frischdampf: ca. 4.000 kWh (≈ 67 %)
 - Speicherwärmeinhalt (Steine, Loren, Kessel) ca. 600 kWh (≈ 10 %)
- Summe: ca. 6.000 kWh (≈ 100 %)**

Während des Steinhärteprozesses teilt sich die Energiemenge etwa wie folgt auf:

- Härteprozess (chemische Reaktionen): ca. 3.900 kWh (≈ 65 %)
 - Speicherwärmeinhalt (Steine, Loren, Kessel) ca. 1.700 kWh (≈ 28 %)
 - Verluste (abgelass. Kondensat und Abstrahlung) - ca. 700 kWh (≈ 7 % Verlust ↑)
- Rest: ca. 5.600 kWh (≈ 93 %)**

Nach der Kesselfahrt teilt sich die Energiemenge etwa wie folgt auf:

- Überlassdampf auf den nächsten Kessel ca. 1.800 kWh (≈ 32 %)
 - Speicherwärmeinhalt (Steine, Loren, Kessel) ca. 2.800 kWh (≈ 47 %)
 - Verluste (Abdampf, Abstrahlung) - ca. 900 kWh (≈ 15 % Verlust ↑)
- Rest: ca. 4.700 kWh (≈ 78 %)**

Die betrachteten Aggregate und Materialien (Rohlinge, Loren, Stahlkessel, eingespeiste Dampfmenge pro Tonne Kalksandstein, Dampfmenge im freien Dampfraum, abgelassene Kondensatmenge, Abdampfmenge, Kondensatmenge in Stein, etc.) wiesen in allen betrachteten Kalksandsteinwerken ähnliche Massen und die entsprechenden Temperaturen (vor, während und nach den Härtekesselreisen) auf. Die Werte liegen etwa auf dem selben Wertenniveau.

In allen betrachteten Kalksandsteinwerke wurden die Rohlinge bei rd. $T = 195 \pm 5^\circ\text{C}$ gehärtet, was aus prozesstechnischen Gründen erforderlich ist. Nur bei diesem Temperaturniveau bilden sich während der Hydrothermalhärtung die erwünschten festigkeitsbildenden Calciumsilikathydratphasen (CSH-Phasen). Aufgrund der o.g. Ursachen der Schwankungen ergaben sich durch diese Berechnungen keine wesentlichen Unterschiede bei den Verbräuchen. Insbesondere konnten auch die für eine exakte Kalkulation erforderlichen Verlustdaten infolge der Abdampfverluste und der Wärmeabstrahlung nicht quantifiziert werden.

4. Thermische Analyse des Kalksandstein-Produktionsprozesses

Thermische Energie wird bei der Kalksandsteinproduktion fast ausschließlich für die hydrothermale Härtung der Rohlinge im Autoklaven benötigt. Im Rahmen der thermischen Analyse erfolgt zunächst die Identifikation der Energieströme im Produktionsprozess. Auf dieser Basis soll geprüft werden, inwieweit durch Modifikationen im Verfahrensablauf Effizienzsteigerungen zu erwarten sind. Da eine direkte Messung der Energieströme nicht möglich ist, wird der Produktionsprozess durch ein Modell abgebildet, mit dem die Energieströme während der verschiedenen Phasen des Produktionsprozesses bestimmt werden können.

4.1 Physikalisches Modell des Härteprozesses

Da beim Pressen der Rohlinge vor allem elektrische Energie benötigt wird, kann dieser Prozessschritt bei der thermischen Analyse vernachlässigt werden. Betrachtet werden die Vorgänge während der hydrothermalen Härtung. Bei der modellmäßigen Beschreibung des Härteprozesses können zwei Ebenen unterschieden werden. Der Prozess setzt sich auf Systemebene aus den Teilkomponenten Dampferzeuger, Dampfschiene sowie den Autoklaven zusammen, zwischen denen die Wärmeströme - gebunden an Sattdampf bzw. Kondensat - übertragen werden. Diese stoffgebundene Wärmeübertragung wird durch die Erhaltungssätze für Masse und Energie beschrieben.

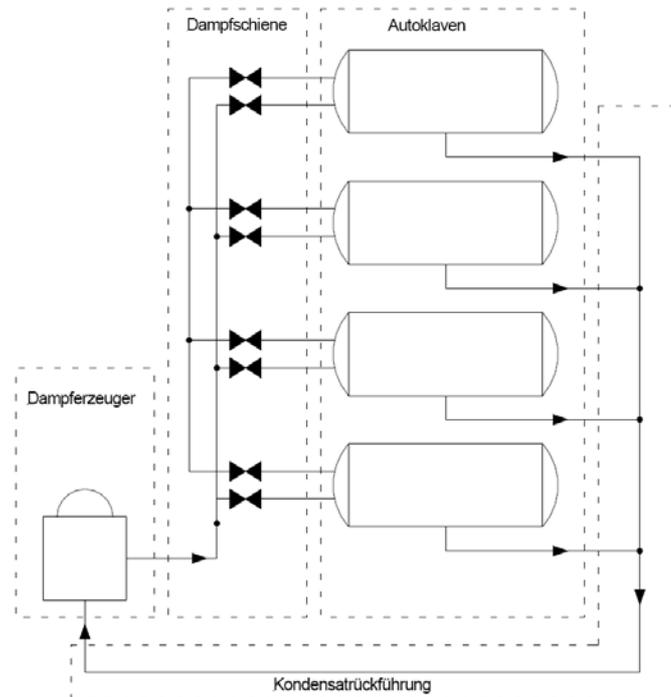


Bild 4.1: Komponenten des hydrothermalen Härteprozesses

Festlegung eines Referenzwerkes

Im Folgenden werden die Energieströme der Grundmodule sowie deren wesentlichen Einflussgrößen und Parameter dargestellt. Für die thermodynamischen Berechnungen wurde das Kalksandstein-Referenzwerk wie folgt definiert:

- **Dampferzeuger:**
 - Leistung: $m_D = 10 \text{ t Dampf/h}$
 - Dampf: $p_e = 16 \text{ bar, } T = 203 \text{ °C}$
 - Zulässiger Betriebsüberdruck: $p_{\max} = 18 \text{ bar}$
 - Wandstärke: $d_W = 12 \text{ mm}$
 - Wasservolumen: $V_W = 25 \text{ m}^3$
 - Oberflächenverluste:
 - Thermische Masse Dampferzeuger: $m_{\text{th}} = 22 \text{ t}$
- **Dampfschiene:**
 - Anzahl der parallelen Rohre
 - 1 x Frischdampf DN125
 - 2 x Überlassdampf DN 150
 - 1 x Abdampf DN200
 - 1 x Kondensat DN 100
 - Volumen der Rohre $V_R \approx 6 \text{ m}^3$
 - Wandstärke der Rohre: $d_R = 5 \text{ mm}$
- **Kalksandsteinpressen:** 2 Stück
- **Härtewagen:**
 - Anzahl der Härtewagen pro Kessel: 10 Stück
 - Abmessungen: $l \times b = 2,62 \text{ m} \times 2,40 \text{ m}$
 - Masse pro Härtewagen: $m = 930 \text{ kg}$
- **Autoklaven: 8 Stück Durchzugskessel**
 - Durchmesser: $\varnothing = 2,40 \text{ m}$
 - Volumen: $V = 123 \text{ m}^3$
 - Masse: $m = 50 \text{ t}$
 - Wartezeit der Rohlinge: $t = 120 \text{ min}$
 - Dauer des Entladevorgangs: $t = 30 \text{ min}$
 - Oberflächenverluste: $W_V = 0,6 \%$
 - Dicke der Isolierung: $d = 150 \text{ mm}$
- **Ausgangstemperaturen zu Beginn der Autoklavenreise:**
 - Temperatur der Autoklaven: $T_A = 60 \text{ °C}$
 - Temperatur der Härtewagen: $T_H = 20 \text{ °C}$
 - Temperatur der Rohlinge: $T_R = 30 \text{ °C}$
 - Außenlufttemperatur: $T_L = 15 \text{ °C}$
- **Kondensatrückführung**
 - Siehe Schaltpläne
 - Sammelbehälter: $2 \times 50 \text{ m}^3$

Die nachfolgende Tabelle 4.1 enthält für die verschiedenen Steinrohdklassen die jeweiligen Angaben zur Kalksandsteinmasse,

Steinrohdklasse	Mittlere Rohdichte	KS-Volumen im Kessel	KS-Masse im Kessel
	t/m ³	m ³	t
1,0	0,95	62	58,9
1,2	1,10	62	68,2
1,4	1,30	62	80,6
1,6	1,50	62	93,0
1,8	1,70	62	105,4
2,0	1,90	62	117,8
2,2	2,10	62	130,2

Tabelle 4.1: Abschätzung der Kalksandsteinmasse im Autoklaven für die Berechnungen

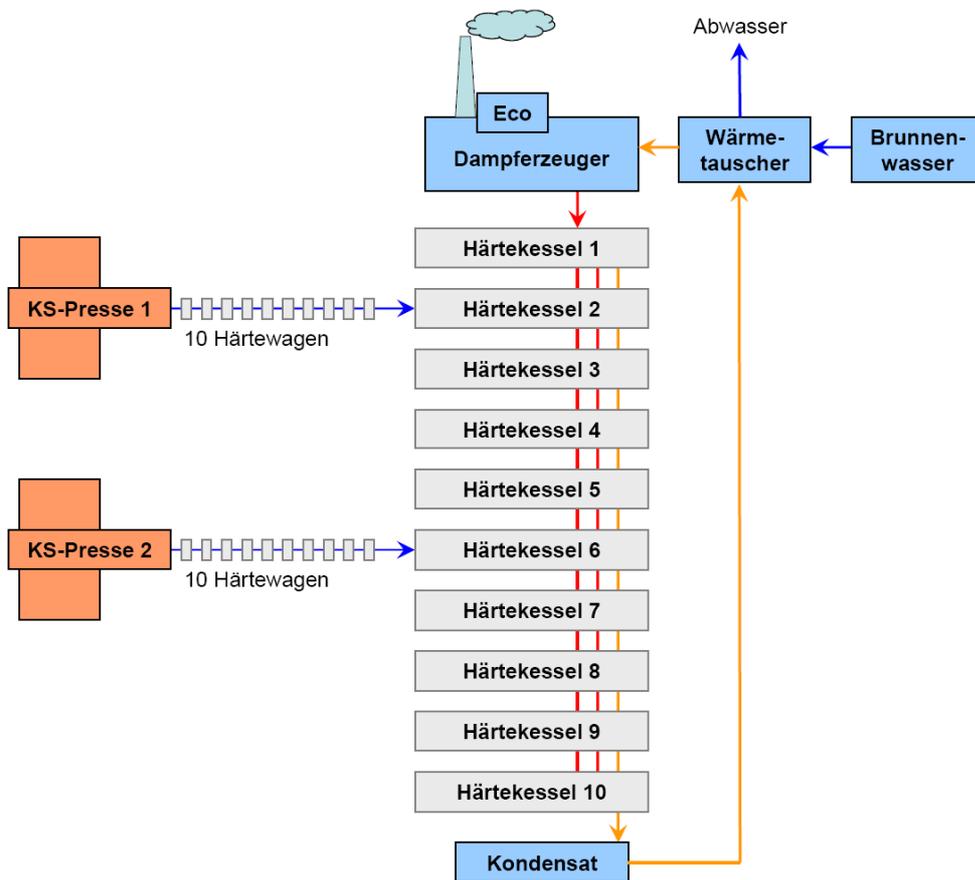


Bild 4.2: Aufbau des Referenz-Kalksandsteinwerkes für die Berechnungen

Von besonderem Interesse sind die Wärmeübertragungsprozesse innerhalb des Autoklaven. Hier lassen sich entsprechend Bild 4.3 mehrere Subkomponenten identifizieren, zwischen denen Wärme- bzw. Stoffströme übertragen werden.

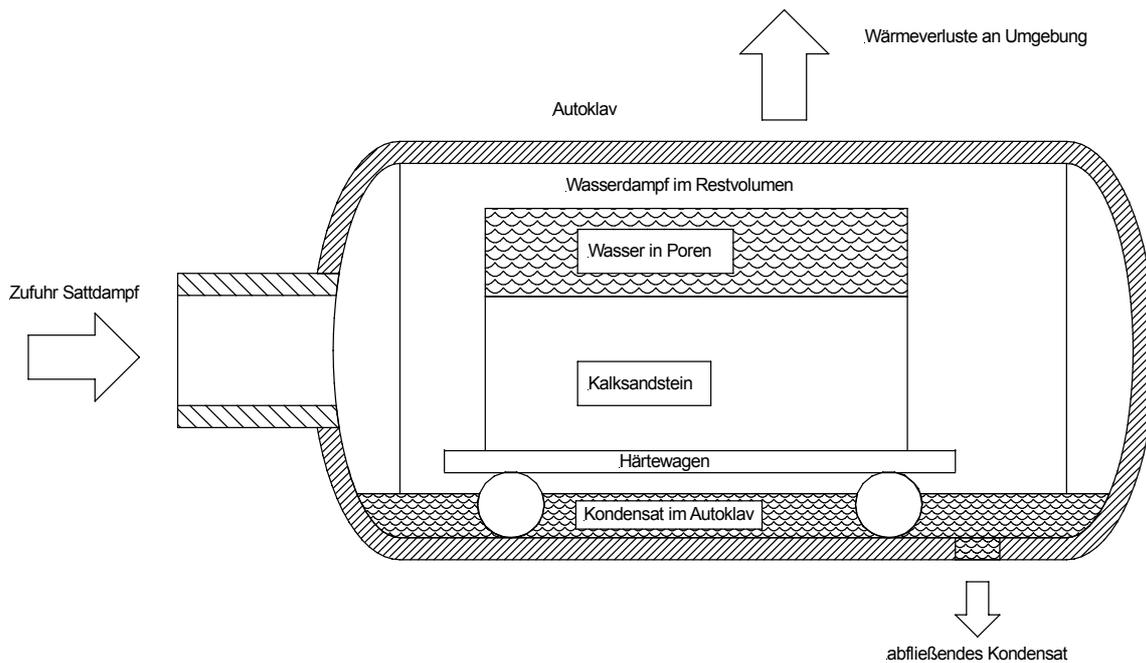


Bild 4.3: Modell des beladenen Autoklaven mit betrachteten Subkomponenten und Stoff- bzw. Wärmeströmen über die Modellgrenzen.

Im Autoklaven werden außer den trockenen Rohlingen, dem Autoklaven sowie dem Härtewagen noch die Wassermasse in den Rohlingen, das Kondensat im Autoklaven sowie der Wasserdampf im freien Volumen innerhalb des Autoklaven als Subkomponenten berücksichtigt. Dem Autoklaven wird Sattdampf vom Dampferzeuger bzw. durch Überströmen zugeführt, Kondensat verlässt den Autoklaven. Der wärmeisolierte Autoklav gibt durch Konvektion und Strahlung Wärme an die Umgebung ab.

Für das physikalische Modell des Autoklaven gilt, dass die zeitliche Änderung der inneren Energie der Differenz der ein- und austretenden Enthalpieströmen entspricht. Die innere Energie entspricht der Summe der inneren Energien der berücksichtigten Teilsysteme:

$$\sum_i \frac{dH_i}{dt} = \sum_j \frac{dU_j}{dt}$$

Berücksichtigt werden folgende Enthalpieströme:

- Ein- / ausströmender Sattdampf: $\frac{dH_{\text{Sattdampf, ein}}}{dt} = \dot{m}_{\text{Sattdampf, ein}} h''$
- Wärmeverluste an die Umgebung: $\frac{dH_{\text{Abwärme}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{Abwärme}}$
- Abgeführtes Kondensat: $\frac{dH_{\text{Kondensat, ab}}}{dt} = \dot{m}_{\text{Kondensat, ab}} h'$

Die innere Energie des Systems setzt sich aus den inneren Energien folgender Teilsysteme zusammen:

- Rohlinge: $\frac{dU_{\text{Rohling}}}{dt} = m_{\text{Rohling}} \frac{du_{\text{Rohling}}}{dt}$
- Wasser in den Rohlingen: $\frac{dU_{\text{Wasser,Rohling}}}{dt} = \frac{d(m_{\text{Wasser,Rohling}} u')}{dt}$
- Sattdampf im Autoklaven: $\frac{dU_{\text{Sattdampf,Autoklav}}}{dt} = \frac{d(m_{\text{Sattdampf,Autoklav}} h'')}{dt}$
- Kondensat im Autoklaven: $\frac{dU_{\text{Kondensat,Autoklav}}}{dt} = \frac{d(m_{\text{Kondensat,Autoklav}} h')}{dt}$
- Autoklav: $\frac{dU_{\text{Autoklav}}}{dt} = m_{\text{Autoklav}} \frac{du_{\text{Autoklav}}}{dt}$
- Härtewagen: $\frac{dU_{\text{Härtewagen}}}{dt} = m_{\text{Härtewagen}} \frac{du_{\text{Härtewagen}}}{dt}$

Die Energiebilanz wird durch eine Massenbilanz ergänzt. Die Trockenmasse der Rohlinge sowie die Stahlmasse des Autoklavenbehälters und der Härtewagen werden als konstant angenommen, damit wird in der Massenbilanz nur noch Kondensat bzw. Wasserdampf berücksichtigt:

$$0 = \sum_j \frac{dm_{\text{H}_2\text{O}_j}}{dt} \Rightarrow 0 = \frac{d m_{\text{Wasser,Rohling}}}{dt} + \frac{d m_{\text{Kondensat,Autoklav}}}{dt} + \frac{d m_{\text{Sattdampf,Autoklav}}}{dt} + \dot{m}_{\text{Sattdampf,ein}} + \dot{m}_{\text{Kondensat,ab}}$$

Eintretende Massenströme werden dabei mit positivem Vorzeichen angenommen, austretende als negativ.

Für die Vervollständigung des Gleichungssystems werden zusätzliche Gleichungen (Schließbedingungen) benötigt. Dies sind einerseits Beschreibungen der thermophysikalischen Stoffwerte in Abhängigkeit von Druck und Temperatur im Autoklaven, andererseits sind Beziehungen für den Wärme- und Stoffübergang zwischen den Subkomponenten erforderlich. Der Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten im Bereich der Kalksandsteinherstellung lag vor allem bei der Untersuchung des Einflusses von Produktionsparametern auf die Qualität des Endproduktes. Grundlegende Untersuchung für die Wärme- und Stofftransportvorgänge unter den Randbedingungen der hydrothermalen Härtung sind nur eingeschränkt verfügbar. Nur mit begrenzter Genauigkeit sind bekannt:

- die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Sattdampf und Rohlingen bei der Kondensation bzw. bei der Rückverdampfung
- die effektive Oberfläche für den Wärmeübergang zwischen Sattdampf und Rohlingen
- Wärmeleitzahlen und Weglängen für den Transport der Wärme innerhalb der Rohlinge
- die spezifische Wärmekapazität der Rohlinge während der verschiedenen Härtungsphasen. In der Literatur werden Werte zwischen $C = 800 - 1000 \text{ J/K}$ angegeben.
- der Wassergehalt in den Rohlingen variiert während der verschiedenen Härtephasen. Die Angaben liegen zwischen $5 - 20 \%$ bezogen auf die Masse der Rohlinge.
- der Anteil der Kondensatmenge im Autoklavenbehälter während der verschiedenen Härtungsphasen

Diese Werte werden darüber hinaus vom Format und Zusammensetzung der Rohlinge beeinflusst. Eine wirklichkeitsnahe Abbildung der instationären Wärmeleitung innerhalb der Rohlinge ist auf Basis des verfügbaren Modellwissens nicht möglich. Für eine Vervollständigung der Bilanzgleichungen werden daher eine Reihe vereinfachender Annahmen getroffen:

- Es herrscht zu jedem Zeitpunkt thermisches Gleichgewicht zwischen den Komponenten, die Temperatur aller Subsysteme entspricht der Siedetemperatur in Abhängigkeit vom Druck im Autoklaven.
- Die spezifische Wärmekapazität der Rohlinge ist linear abhängig vom Druck im Autoklaven und variiert zwischen 5 bis 15 %.
- Kondensierendes Wasser wird abgeleitet, es erfolgt keine Einspeicherung von Kondensat im Autoklavenvolumen.

Die Programmentwicklung zielt vor allem auf die Identifikation von Potenzialen zur Steigerung der Effizienz bei der hydrothermalen Härtung ab. Aufgrund der erforderlichen Vereinfachungen ist die Genauigkeit der berechneten Absolutwerte des Energieverbrauchs begrenzt, jedoch kann durch einen relativen Vergleich der Verbrauchswerte die Auswirkungen von Modifikationen abgeschätzt werden.

4.2 Analyse des Einzelautoklaven

Zunächst werden die Vorgänge beim Hochfahren des Autoklaven untersucht, d.h. in der Phase der Dampfhärtung, bei der durch Zufuhr von Sattedampf, Druck und Temperatur im Autoklaven gesteigert werden. Der eintretende Sattedampf kondensiert dabei auf den Rohlingen, bis diese die dem Druck im Autoklaven entsprechende Siedetemperatur erreicht haben. Entsprechend des vorgegebenen Wassergehaltes verbleibt ein Teil des kapillar aufgenommenen Kondensats in den Rohlingen, der Rest wird aus dem Autoklaven abgeleitet. Der zuströmende Sattedampf muss darüber hinaus Energie für die Verdichtung des Wasserdampfes im Autoklavenvolumen und die Erwärmung der Härtewagen bereitstellen. Die Temperatur des bereits in den Poren der Rohlinge enthaltenen Wassers muss ebenfalls durch kondensierenden Sattedampf angehoben werden.

Für einen Autoklaven mit $m = 50$ t Behältermasse, der mit $V = 62$ m³ Rohlingen der Dichte $\rho = 1.700$ kg/m³ ergibt sich beispielsweise ein Verlauf nach Bild 4.4. Es wurde dabei eine Starttemperatur von $T = 20$ °C für alle Komponenten angenommen.

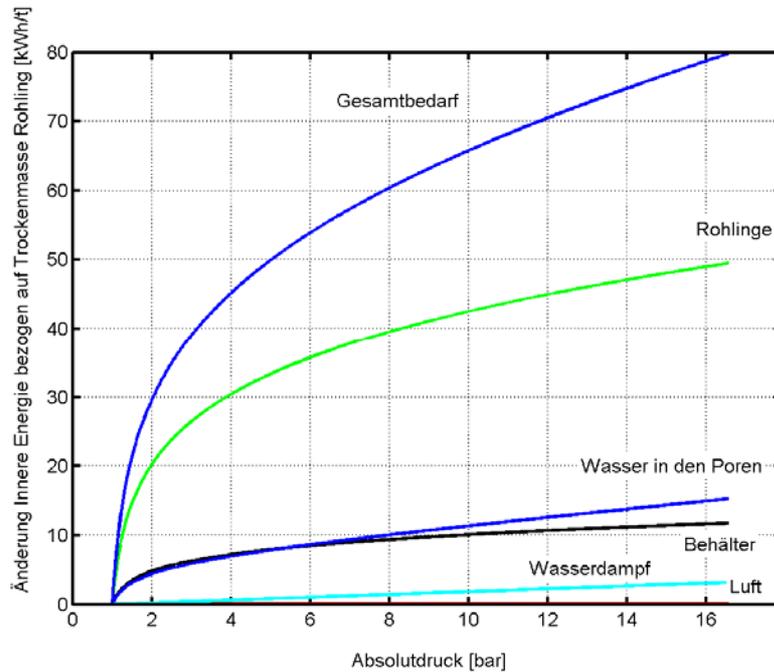


Bild 4.4: Beispielhafte Energieverteilung im Autoklaven bei der Druckerhöhung durch Zufuhr von Satttdampf

Bei der Berechnung ergab sich ein Energiebedarf von ca. $P = 80 \text{ kWh/t}$ bezogen auf die Trockenmasse der Rohlinge. Dieser Wert stimmt gut mit den Erfahrungswerten aus der Produktion überein [9, 10]. Aus der relativ geringen Differenz zwischen theoretischem und realem Wert folgt auch, dass das Verbesserungspotenzial des aktuellen Verfahrens begrenzt ist.

Bild 4.5 zeigt den jeweiligen Anteil der Subkomponenten am Gesamtenergiebedarf. Erwartungsgemäß wird der größte Anteil (ca. 62 %) für das Hochheizen der Rohlinge benötigt. Ein signifikanter Anteil (ca. 19 %) ist für die Erwärmung des Wassers in den Rohlingen erforderlich. Der relativ große Bedarf für die Wassererwärmung erklärt sich aus dem hohen Werte der spezifischen Wärmekapazität von Wasser (ca. 4.000 J/(kgK)). Für die Aufheizung des Behälters werden ca. 13 % benötigt, ca. 5 % sind im Wasserdampf im freien Behältervolumen enthalten. Der Energiebedarf für die Erhitzung der Luft ist vernachlässigbar, was sich aus der geringen Masse erklärt, die selbst ohne Evakuieren oder Spülen nur bei ca. 1 kg/m^3 liegt.

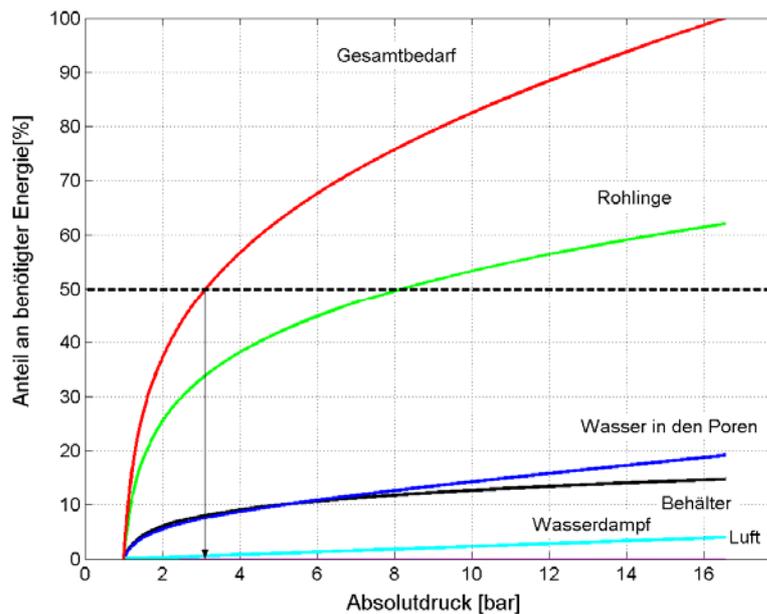


Bild 4.5: Prozentualer Anteil der Subkomponenten am Gesamtenergiebedarf während des Hochfahrens des Autoklaven

Aus Bild 4.5 folgt auch, dass ein Großteil der Energie im unteren Druckbereich benötigt wird. Bis zu einem Partialdruck des Wasserdampfes von $p_e = 1$ bar (Absolutdruck ca. $p_e = 2$ bar) werden bereits ca. 35% der insgesamt erforderlichen Energie benötigt, bei ca. $p_e = 3$ bar Absolutdruck wurde etwa die Hälfte der benötigten Energie aufgenommen. Dagegen wird bei einer Druckerhöhung von $p_e = 8$ auf 16 bar nur 25 % der Gesamtenergie übertragen. Ursache hierfür ist der nichtlineare Verlauf der Siedetemperatur in Abhängigkeit vom Druck: Eine Partialdruckerhöhung von $p_e = 0.5$ bar auf 1 bar führt zu einer Erhöhung der Siedetemperatur von $T = 81$ auf 100 °C, eine Druckerhöhung von $p_e = 8$ auf 15 bar führt zu einer Erhöhung der Siedetemperatur von $T = 170$ auf 198 °C.

Energieanteile, die für das Aufheizen des Autoklaven benötigt werden, sowie die Energie, die im Wasserdampf bzw. in der Luft enthalten ist, sind von untergeordneter Bedeutung.

Aus der Bedeutung des unteren Druckbereiches für die Energieübertragung im Autoklaven ergibt sich auch ein begrenztes Potenzial für die Energierückgewinnung durch Überströmen. Wenn der Druck in einem gebenden Autoklaven von $p_e = 16$ auf 8 bar reduziert wird, ist damit eine maximale Reduzierung der Energie von 25 % verbunden, wobei diese Absenkung auch mit Blick auf die Qualität der Kalksandsteine so langsam erfolgen muss, dass eine entsprechende Rückverdampfung schadensfrei möglich ist. Es ist anzunehmen, dass die tatsächlich nutzbare Abwärme deutlich geringer ist.

Der Energieinhalt des Autoklavenbehälters steigt nährungsweise linear mit der Temperatur. Die in Bild 4.4 / Bild 4.5 dargestellten Ergebnisse gelten für eine Anfangstemperatur von $T = 20$ °C. Wenn es gelingen würde, den Autoklaven nach Ende eines Produktionszyklus durch rasches Ausfahren der Rohlinge und anschließendem Verschließen bei $T = 100$ °C zu halten, könnte der Energiebedarf für die Aufheizung des Behälters von ca. 12 kWh pro t Rohlingsmasse auf 7 kWh reduziert werden.

4.3 Analyse Autoklavengruppe

Der Energiebedarf der hydrothermalen Härtung kann durch Überleiten von Dampf aus einem Autoklaven, in dem der Härtezyklus beendet ist, an einen zweiten Autoklaven, der den Maximaldruck noch nicht erreicht hat, reduziert werden. Da das Überleiten eine Druckdifferenz zwischen gebenden und aufnehmenden Autoklaven erfordert, kann ein Überströmen nur bis zum Druckausgleich erfolgen. Beim mehrfachen Überströmen wird Sattdampf auf verschiedene Autoklaven verteilt. Für die Bestimmung des Potentials wurde entsprechend Bild 4.1 ein System aus vier Autoklaven betrachtet. Es wurde dann für vier gleich beladene Autoklaven untersucht, inwieweit der Energiebedarf von der Anzahl der Überströmvorgänge abhängt.

Es wurde zunächst ein Autoklav angefahren. Dessen Dampf wurde nach Ende des Härtezyklus von einem zweiten Autoklaven aufgenommen. War kein Dampf auf einem Autoklaven verfügbar, wurde Dampf aus dem Dampferzeuger genutzt. Dampf aus einem Autoklav wurde auf unterschiedlichem Druckniveau an bis zu drei andere Autoklaven abgegeben. Bei einer ausreichenden Anzahl von Produktionszyklen konnte unter den hier getroffenen Annahmen kein Einfluss der Anzahl der Überstromvorgänge festgestellt werden, der spezifische Energiebedarf bezogen auf die Masse der Rohlinge blieb gleich. Während einfaches Überströmen zu deutlichen Einsparungen führt, konnten im Rahmen dieser Berechnungen keine weitere Verbesserungen bei zwei- bzw. dreifachem Überströmen beobachtet werden. Vorausgesetzt wurde dabei eine Beladung der Autoklaven mit gleicher Masse sowie ein Abbruch des Überströmvorganges bei $p_e = 3$ bar.

Das begrenzte Potenzial der mehrfachen Überleitung kann aus der Analyse eines Autoklavenpaares abgeleitet werden, wobei Sattdampf aus einem Autoklaven in den zweiten Autoklaven überströmt, beide Systeme werden als gleich angenommen was die Beladung betrifft. Bild 4.6 zeigt für beide Autoklaven jeweils den Verlauf des Druckes sowie die dabei pro Tonne Rohlinge übertragenen Energiemenge. Die Dauer des Überstromvorganges wird von der Druckdifferenz bestimmt, diese hängt auch von den Drosselvorgängen in der Dampfschiene ab. Bei Annahme einer gleichen Beladung erfolgt ein Druckausgleich erst bei ca. $p_e = 2$ bar. Hieraus folgt, dass der wesentliche Anteil der Energie aus dem gebenden Autoklaven bereits bei einem einfachen Überströmvorgang genutzt werden kann. Nach dem Druckausgleich könnte aus dem gebenden Autoklaven noch Dampf an einen weiteren Autoklaven übergelassen werden, jedoch ist die treibende Druckdifferenz dann sehr gering.

Bild 4.7 zeigt den Überstromvorgang für den Fall, dass die Temperatur im aufnehmenden Autoklaven zu Beginn bei $T = 100$ °C liegt und im Autoklaven eine reine Wasserdampf-atmosphäre bei 1 bar herrscht. In diesem Fall stellt sich ein Druckausgleich bereits bei ca. 4.8 bar ein, die übertragene Energie ist dann deutlich geringer als im ersten Fall. Hier wäre die Nutzung der im gebenden Autoklaven verbliebenen Energie durch Überleiten des Dampfes an einen weiteren Autoklaven auf niedrigerem Druckniveau naheliegend. Die dann insgesamt übergeleitete Energie ist allerdings auch nicht größer als im zuvor betrachteten Fall mit der einfachen Überleitung bei einer Starttemperatur von $T = 20$ °C im hochfahrenden Autoklaven.

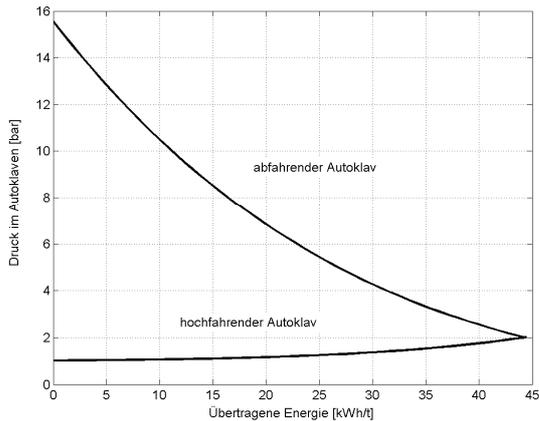


Bild 4.6: Überströmen Sattdampf, Starttemperatur hochfahrender Autoklav $T = 20\text{ °C}$, Luft-/Wasserdampfatmosfera

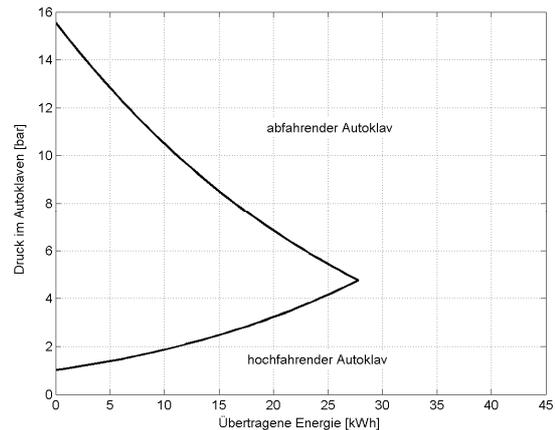


Bild 4.7: Überströmen Sattdampf, Starttemperatur hochfahrender Autoklav $T = 100\text{ °C}$, Wasserdampfatmosfera

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde eine gleiche Beladung der Autoklaven angenommen. Unterscheidet sich die Masse von gebendem und aufnehmendem Autoklaven, so wird auch der Druckverlauf während des Ausgleichvorganges beeinflusst. In Bild 4.8 ist der Überstromvorgang für den Fall dargestellt, dass die Masse der Rohlinge des abgehenden Autoklaven doppelt so groß ist wie die Masse der Rohlinge im hochfahrenden Autoklaven, die Starttemperatur liegt hier wieder bei $T = 20\text{ °C}$. Der Druck steigt im aufnehmenden Autoklaven schneller an als zuvor, da eine kleinere Rohlingsmasse erwärmt werden muss, im gebenden Autoklaven fällt der Druck weniger schnell ab, da eine größere thermische Masse verfügbar ist, aus der Wärme ausgespeichert werden kann, der Druckausgleich findet bei ca. $p_e = 4\text{ bar}$ statt.

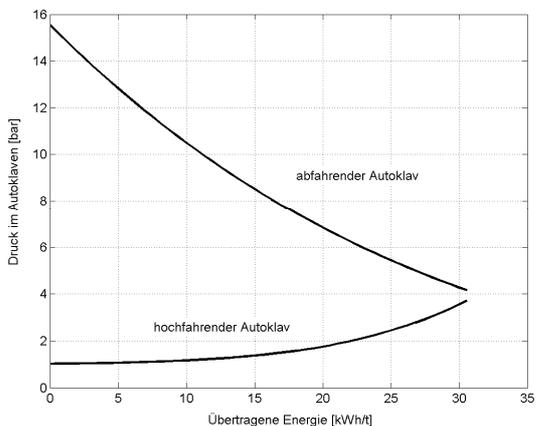


Bild 4.8: Überströmen Sattdampf, abfahrender Autoklav mit doppelter Masse Rohlinge des hochfahrenden Autoklaven

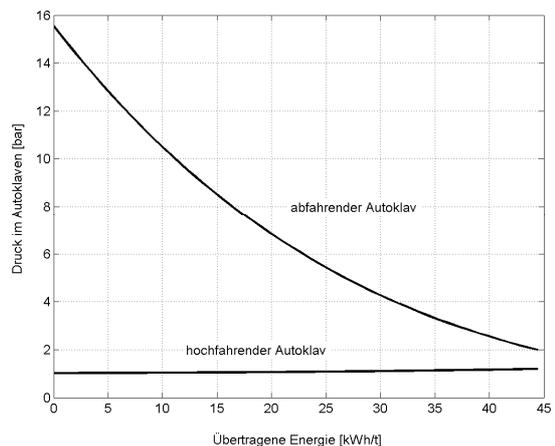


Bild 4.9: Überströmen Sattdampf, abfahrender Autoklav mit 50% der Masse Rohlinge des hochfahrenden Autoklaven

Im Unterschied dazu zeigt Bild 4.9 die Situation für den umgekehrten Fall. Ist die Masse im hochfahrenden Autoklaven größer, verläuft der Druckanstieg langsamer, der Ausgleich findet bei geringerem Druck statt, ein größerer Anteil der Energie kann übertragen werden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass sich die Darstellung auf die übertragene Energie pro Tonne Rohlingsmasse bezieht, bei doppelter Beladung des abgehenden Autoklaven wird im Fall nach Bild 4.8 daher mehr Energie übertragen.

4.4 Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz

Das Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz ist bei dem heutigen Verfahren zur hydrothermalen Härtung von Kalksandsteinen begrenzt. Nachteilig ist, dass die Druckdifferenz die treibende Kraft für das Überlassen von Dampf zwischen Autoklaven ist und sich dadurch Grenzen für den minimalen Druck im abgebenden Autoklaven ergeben, andererseits jedoch die Temperatur in den Autoklaven deren Energieinhalt bestimmt. Häufig wird das Überlassen bei einem Druck von $p_e = 3$ bar im gebenden Autoklaven beendet, weil dann das Druckgefälle zwischen den Autoklaven nicht mehr ausreichend ist. Wie sich bei der Analyse des Einzelspeichers in 4.2 zeigte, ist dann etwa noch die Hälfte der zuvor zugeführten Energie noch im gebenden Autoklaven enthalten und wird nicht genutzt. Eine Modifikation der Fahrweise der Autoklaven ist nur dann sinnvoll, wenn eine stärkere Druckabsenkung im gebenden Autoklaven erreicht wird.

Als kurzfristige Maßnahmen mit begrenztem Aufwand konnten folgende Modifikationen identifiziert werden zur Steigerung der energetischen Effizienz identifiziert werden:

- Die Rohlinge erreichen in den Autoklaven eine Temperatur von ca. $T = 200$ °C. Der Energiebedarf für die hydrothermale Härtung hängt näherungsweise linear mit der Temperaturdifferenz zusammen, die bei der Druckerhöhung durchlaufen wird. Werden die Rohlinge mit einer Temperatur von $T = 20$ °C eingebracht, so beträgt die Temperaturdifferenz während der Härtung $\Delta T = 180$ °C. Liegt die Temperatur der Rohlinge zu Beginn höher, reduziert sich pro °C Temperaturerhöhung die benötigte Energie um ca. 0.5 %. Es sollte daher geprüft werden, ob es möglich ist, die Temperatur der Rohlinge nach dem Pressvorgang höher zu halten, indem beispielsweise die Wärmeverluste bis zum Einfahren in den Autoklaven durch Abdeckungen reduziert werden.
- Nach Ende der Härtereise sollte versucht werden, die Temperatur des Autoklaven bis zum Einfahren der nächsten Rohlinge möglichst hoch zu halten. Das Öffnen der Deckel sollte auf einen minimalen Zeitraum begrenzt werden. Die Verluste durch Ausströmen heißer Luft können durch Anbringen entsprechender flexibler Abdeckungen (Streifenvorhang) an den Öffnungen des Autoklaven reduziert werden, wobei eine Behinderung beim Ein- und Ausfahren der Rohlinge vermieden werden muss.
- Das Kondensat, das während der Haltephase im Autoklaven anfällt, sollte nicht abgeleitet werden. Bei der abschließenden Druckreduzierung stellt dieses Wasserreservoir Energie für eine Rückverdampfung bereit und kann dadurch i.d.R. bei höheren Temperaturen genutzt werden, als dies bei der Kondensatnutzung möglich ist. Eventuell sollten Auffangbehälter im unteren Bereich des Autoklaven für das anfallende Kondensat angebracht werden. Dieser Behälter steht nicht mit dem Autoklaven in festem Kontakt.

Achtung! Bei diesen angedachten Maßnahmen muss geprüft werden, ob eine Beeinträchtigung der Produktqualität und der Sicherheit des Kesselbetriebes (Scheitel-Sohle-Messung) zu erwarten ist. Änderungen der Kesselfahrweise sind in jedem Fall zwingend vorher mit den zuständigen Aufsichtsbehörden abzustimmen.

5 Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz

Signifikante Steigerungen der Energieeffizienz können bei der Kalksandsteinproduktion nur bei Modifikationen des heute üblichen Verfahrens erreicht werden. Das Potenzial von Einsparungen ist dabei erheblich, es sind dann allerdings umfangreiche Änderungen erforderlich, die teilweise nur bei Neuanlagen umgesetzt werden können bzw. noch weitere Entwicklungsarbeiten erfordern, bevor ein industrieller Einsatz erfolgen kann. Im folgenden werden diese Optionen dargestellt.

5.1 Verstromung von überschüssigem Abdampf

Die Verstromung überschüssiger Prozesswärme in einem thermischen Kreisprozess kann attraktiv sein, wenn kein alternativer Verbraucher von Wärme verfügbar ist. Derzeit sind Energieumwandlungssysteme verfügbar, die thermische Energie auch noch bei $T = 80^\circ\text{C}$ in mechanische Arbeit umwandeln können, die dann zum Antrieb eines Generators genutzt werden kann. Anwendungsbereiche sind vor allem die Geothermie und die Nutzung industrieller Abwärme. Für die Umwandlung sind verschiedene thermische Kreisprozesse verfügbar.

- Dampfturbinen; zahlreiche installierte Systeme, typische Prozesstemperaturen $T > 250^\circ\text{C}$, Leistung $P > 1 \text{ MW}$ (elektrisch)
- Turbinen mit organischen Arbeitsmedien (organic Rankine cycle, ORC), zahlreiche installierte Systeme, typische Prozesstemperaturen $T > 120^\circ\text{C}$, Leistung $P > 200 \text{ kW}$ (elektrisch)
- Kalina-Zyklus, geringe Anzahl installierter Systeme, nutzt Wärme auch noch bei $T = 80^\circ\text{C}$
- Stirlingmotoren; geringe Anzahl installierter Systeme, komplexer Aufbau, nur sehr kleine Leistungen und Temperaturen möglich

Der Wirkungsgrad dieser Systeme entspricht dem Verhältnis aus abgegebener mechanischer Leistung zur zugeführten Leistung:

Leistung thermische zugeführte Leistung mechanisch abgegebene ad Wirkungsgrad:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene mechanische Leistung}}{\text{zugeführte thermische Leistung}}$$

Für alle thermodynamischen Prozesse gilt als theoretischer Maximalwert der CARNOT-Wirkungsgrad, der sich aus der maximalen Temperatur (Einheit: Kelvin) des Prozesses T_{max} und der minimalen Temperatur T_{min} ergibt:

$$\text{Carnot - Wirkungsgrad} = 100\% \cdot \left(1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \right)$$

Der Wirkungsgrad realer Maschinen liegt deutlich unterhalb von diesem theoretischen Grenzwert. Für den Temperaturbereich der hydrothermalen Härtung ist in Bild 5.1 der Verlauf des CARNOT-Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der maximalen Temperatur (d.h. Temperatur der verfügbaren Abwärme) dargestellt. Für die untere Temperatur (Temperatur der Wärmeabgabe an die Umgebung) wurden $T = 40\text{ °C}$ angenommen.

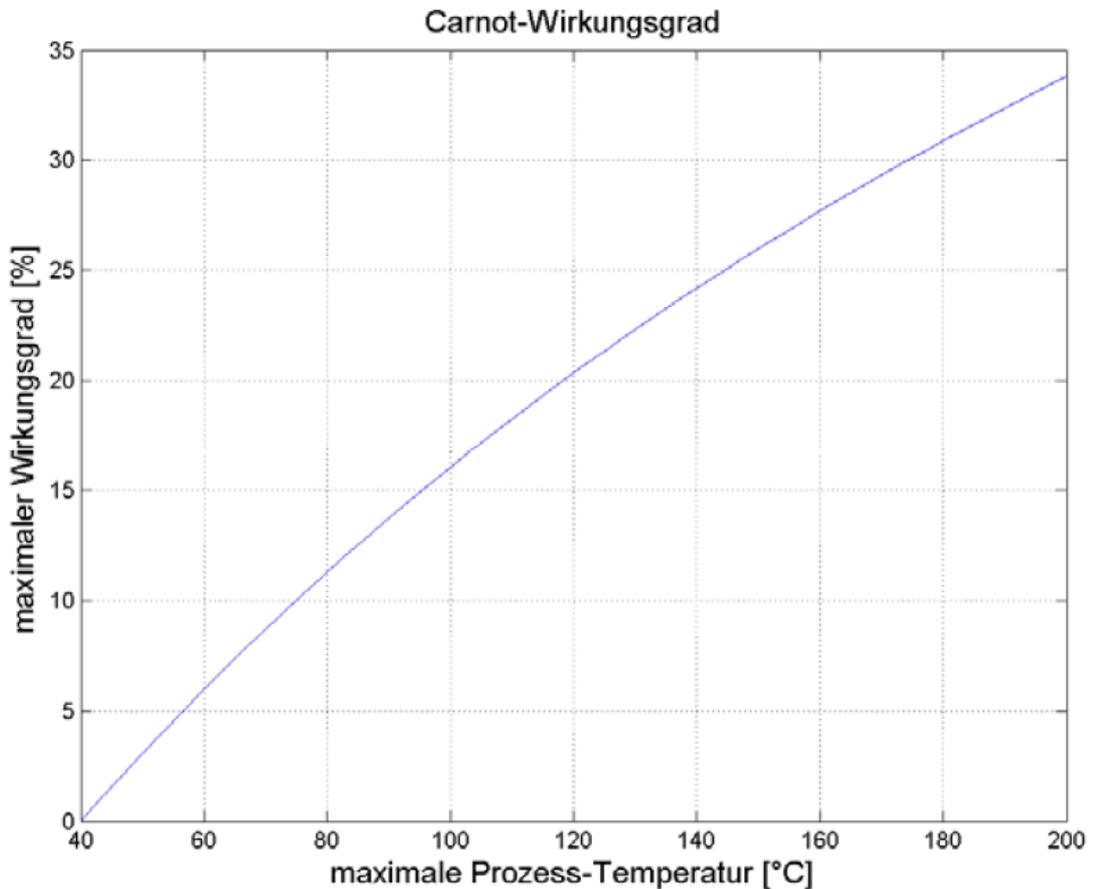


Bild 5.1: Theoretischer Maximalwert eines Umwandlungsprozesses in Abhängigkeit der Temperatur der verfügbaren Abwärme

Aus Bild 5.1 folgt, dass der Grenzwert für den Wirkungsgrad bei einer Abwärmtemperatur von $T = 200\text{ °C}$ bei ca. 33 % liegt, bei $T = 100\text{ °C}$ liegt der entsprechende Wert bei 16 %. Tatsächliche Werte dürften etwa bei der Hälfte dieser Werte liegen, also bei ca. 17 % (200 °C) bzw. 8% (100 °C). Daraus folgt, dass aus $P = 1\text{ MW}$ verfügbarer thermischer Abwärme $P = 170\text{ kW}$ bzw. $P = 80\text{ kW}$ erzeugt werden könnten. Niedrige thermische Wirkungsgrade bewirken höhere Investitionskosten für Peripherie-Komponenten wie Wärmeüberträger, Rohrleitungen und Pumpen, da bezogen auf die elektrische Leistung größere Wärmemengen übertragen werden müssen.

Nachteilig ist auch der Umfang der anfallenden Abwärme: aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades muss der Großteil der zugeführten thermischen Energie als Abwärme bei niedriger Temperatur an die Umgebung abgeführt werden, die dafür erforderliche Ventilationsleistung kann die Netto-Stromerzeugung deutlich reduzieren.

Die auf die elektrische Leistung bezogenen spezifischen Investitionskosten von Energiewandlern sind für kleinere Aggregate deutlich höher. Bild 5.2 zeigt die Abhängigkeit der leistungsspezifischen Kosten von der Gesamtleistung einer Anlage. Für ein Kalksandsteinwerk liegt die erwartete elektrische Leistung wahrscheinlich unterhalb von $P = 0.4$ MW, die Investitionskosten liegen damit in einem Bereich von 1.500,- bis 2.000,- € pro kW elektrischer Leistung, eine Anlage mit $P = 200$ kW würde ca. 400.000,- € Investitionskosten für den Energiewandler erfordern.

Zur Vermeidung von Anfahrverlusten und Teillastbetrieb sollte eine derartige Anlage möglichst durchgehend betrieben werden, der Betrieb sollte über einen thermischen Speicher erfolgen. Der durchschnittliche Energieverbrauch für die Dampferzeugung beträgt $P = 9,35$ MWh/Jahr [9], daraus folgt eine mittlere Leistung von ca. $P = 1,14$ MW. Selbst wenn diese Energie vollständig als Abwärme zur Stromerzeugung verfügbar wäre, würde daraus bei einem Wirkungsgrad von 10% (optimistischer Wert) eine mittlere Leistung von $P = 100$ kW (elektrisch) erzeugt werden könnte. Es erscheint in der Konsequenz fragwürdig, ob eine Anlage mit einer derartig kleinen Leistung wirtschaftlich sinnvoll betrieben werden könnte.

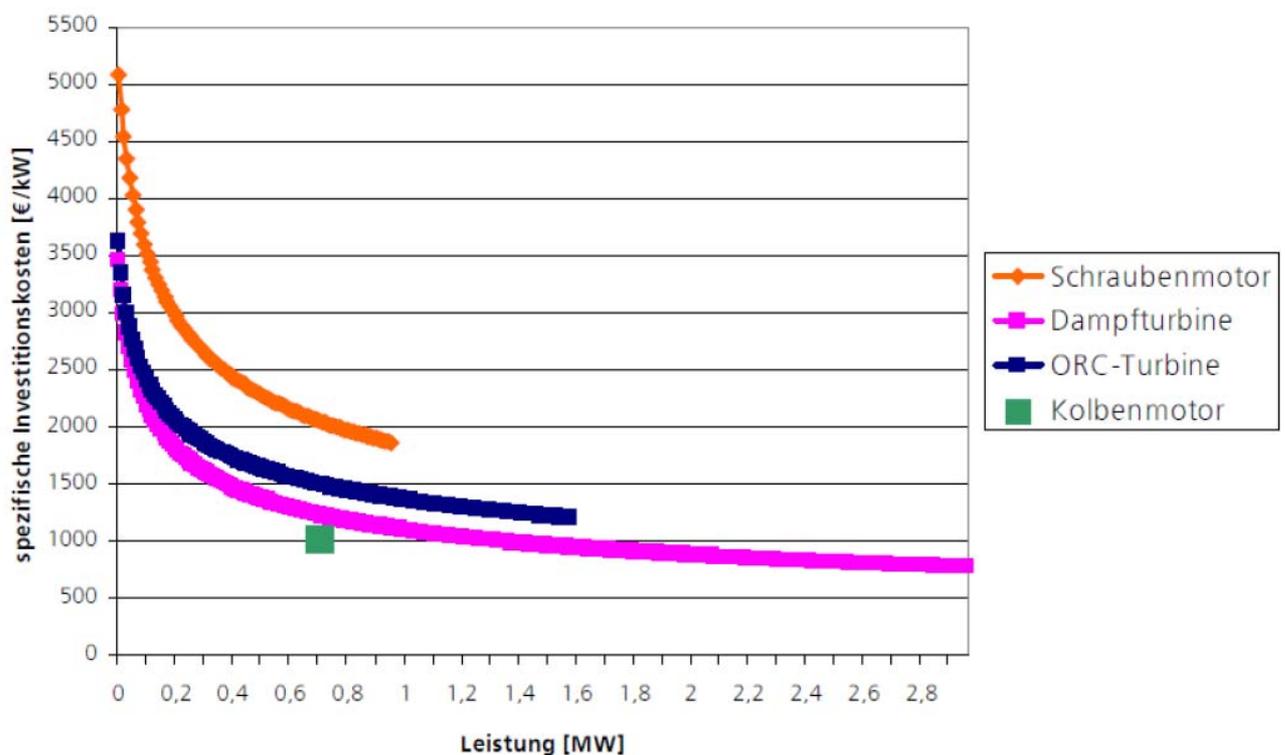


Bild 5.2: Leistungsspezifische Investitionskosten verschiedener Konzepte zur Umwandlung von Abwärme in Strom [11]

Hier ergeben sich jedoch bereits theoretisch aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus der verfügbaren Abwärme geringe Maximalwerte für den erreichbaren Wirkungsgrad. Nachteilig ist darüber hinaus der diskontinuierliche Anfall der Abwärme, was zu Effizienzeinbußen aufgrund von Leistungstransienten führt.

5.2 Einsatz thermischer Energiespeicher

5.2.1 Grundkonzepte

Der Einsatz thermischer Energiespeicher ermöglicht eine verbesserte Nutzung der anfallende Abwärme. Durch die Zwischenspeicherung können zeitliche Differenzen zwischen Abwärmeangebot und Wärmebedarf ausgeglichen werden. Entscheidend für den erfolgreichen Einsatz thermischer Energiespeicher ist eine möglichst gute Anpassung an die spezifischen Randbedingungen einer Anwendung. Für den Temperaturbereich über $T = 100\text{ °C}$ wurden verschiedene Grundkonzepte entwickelt, die im folgenden kurz dargestellt werden sollen.

Ruths-Speicher (Dampfspeicher)

Beim Ruths-Speicher [12] wird flüssiges Wasser bei Drücken von $p > 1\text{ bar}$ als Speichermedium eingesetzt, um auch bei Temperaturen $T > 100\text{ °C}$ die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser nutzen zu können (Bild 5.3). Die Beladung erfolgt über Dampf, der in das Wasservolumen eingeblasen wird und unter Wärmeabgabe kondensiert. Bei der Entladung wird dem System Sattdampf entnommen, die für die Dampferzeugung erforderliche Energie wird der sensiblen Wärme des Wasservolumens entnommen.

In Abhängigkeit vom Beladezustand ändert sich der Druck im Speicher, der Sattdampf wird bei der Entladung mit sinkendem Druck abgegeben. Beim Ruths-Speicher ist das Arbeitsmedium mit dem Speichermedium identisch, es können daher hohe Entladeleistungen realisiert werden. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Ruths-Speichers ist der Maximaldruck, der die Wandstärke des Behälters als wesentlichen Kostenfaktor bestimmt, sowie die Temperaturdifferenz während der Entladung, aus der sich die Speicherdichte ergibt. Eine wirtschaftliche Grenze für den Einsatz von Ruthsspeichern liegt bei etwa $T = 220\text{ °C}$, vereinzelt wurden auch Systeme bei höheren Drücken eingesetzt. Durchläuft der Ruths-Speicher bei der Entladung beispielsweise einen Druckabfall von $p_e = 15\text{ bar}$ auf $p_e = 5\text{ bar}$, so ändert sich die Siedetemperatur dabei um ca. $T = 50\text{ °C}$, die volumetrische Speicherdichte liegt dann bei ca. 50 kWh/m^3 .

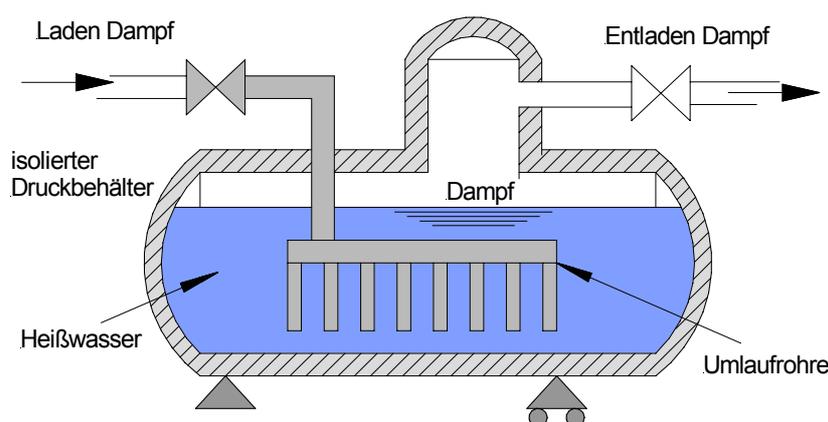


Bild 5.3: Vereinfachte Prinzipdarstellung Ruths-Speicher

Zweitank-Speicher

Beim Zweitank-Speicher-Konzept wird das flüssige Speichermedium in Abhängigkeit vom Beladezustand ein heißes und ein kaltes Teilvolumen getrennt. Ist das Speichermedium nicht identisch mit dem Arbeitsmedium, wird in einem Wärmeüberträger die Energie zwischen den beiden Fluiden übertragen. Die Behälter für das Speichermedium sollen vorzugsweise drucklos sein, daher werden bei Temperaturen $T > 100^\circ\text{C}$ Thermoöle oder Salzschnmelzen als Speichermedien eingesetzt.

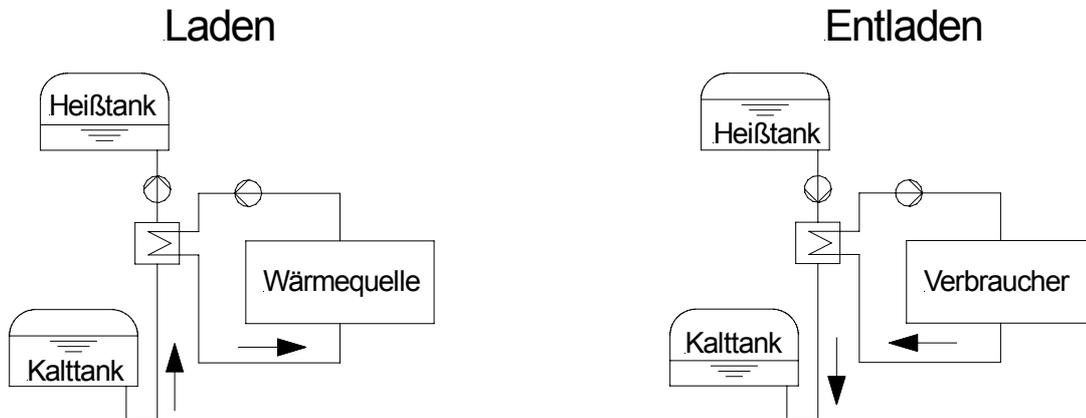


Bild 5.4: Speicherkonzept bei dem thermische Energie in ein flüssiges Speichermedium eingekoppelt wird, das über einen Wärmeüberträger zwischen zwei Behältern umgepumpt wird

Thermoöle können drucklos bis zu maximalen Temperaturen von ca. $T = 320^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Berücksichtigt werden müssen dabei vor allem Umweltaspekte sowie Brandschutzvorschriften. Die Zusammensetzung der Thermoöle muss regelmäßig überprüft werden, gegebenenfalls muss Thermoöl ganz oder teilweise ersetzt werden. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ beträgt die volumetrische Speicherdichte eines Ölspeichers ca. 50 kWh/m^3 .

Neben Druckwasser bieten sich noch flüssige Salze als Speichermedien an. Bei der Verwendung von Nitratsalzen muss die Erstarrungstemperatur beachtet werden. Diese liegen bei den üblichen Salzen bei 142°C (eutektische Mischung $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3 / \text{NaNO}_3$) bzw. $T = 230^\circ\text{C}$ (eutektische Mischung $\text{NaNO}_3 / \text{KNO}_3$). Die Kosten des binären Eutektikums liegen bei ca. 800 € / t , das ternäre Eutektikum kostet ca. 50% mehr. Die maximale Einsatztemperatur der Nitratsalze liegt bei etwa $T = 540^\circ\text{C}$, mit steigender Temperatur gewinnen jedoch Korrosionsaspekte an Bedeutung und müssen bei der Auswahl des Materials für die Speicherbehälter berücksichtigt werden. Die volumetrische Speicherdichte eines Salzspeichers beträgt bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ etwa $P = 80 \text{ kWh/ m}^3$.

Speicher- material	Dichte [kg/m ³]	Spezifische Wärme- kapazität [kJ/kgK]	Temperaturdifferenz $\Delta T = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	
			Volumenspez. Speicherkapazität [kWh/m ³]	Kapazitätsspez. Kosten Material [€/kWh]
Druckwasser (250 °C, 40 bar)	798	4.865	100	-
Mineralöl (< 320 °C)	800	2.4	50	15
Flüssigsalz NaNO ₃ / KNO ₃ (220 °C <, > 570 °C)	1950	1.5	80	20
Beton	2200	0.7	44	4

Tabelle 5.1: Übersicht Speichermaterialien für sensible Wärmespeicher

Feststoffspeicher

Beim Feststoffspeicher wird beispielsweise Beton als Speichermedium eingesetzt, dessen reine Materialkosten mit 60 bis 80 €/t deutlich unter den entsprechenden Kosten flüssiger Speichermedien liegen. Auch Kalksandsteinmaterial ist prinzipiell möglich. Demgegenüber ist jedoch die Wärmeeinkopplung in ein festes Speichermedium aufwändiger als dies bei Flüssigkeiten der Fall ist. Eine Möglichkeit zur Wärmeübertragung zwischen einem Arbeitsmedium und dem Speichermaterial ist die Integration eines Wärmeüberträgers in das Speichervolumen. Die Geometrie des Wärmeüberträgers hat einen wesentlichen Einfluss auf die Maximalleistung und die Kosten des Systems. Betonspeicher können bei Temperaturen bis zu $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Es wurden Speichermodule mit Längen von $l = 9 \text{ m}$ und ca. $l = 14 \text{ m}$ gebaut. Unter Berücksichtigung von Transportaspekten liegt die Maximallänge eines Einzelmoduls bei ca. $l = 18 \text{ m}$, das Volumen beträgt dann ca. $V = 200 \text{ m}^3$.



Bild 5.4: Rohrregister 400 kWh, Testmodul vor dem Vergießen mit Beton



Bild 5.5: Testmodul nach dem Vergießen mit Beton, noch ohne Isolation

Ist die zu speichernde Wärme an ein gasförmiges Medium bei Umgebungsdruck gebunden, können auch Schütttspeicher eingesetzt werden. Dabei wird eine Schüttung bestehend aus Speicherelementen durchströmt, die die thermische Energie aufnehmen, wenn die Gastemperatur über der Temperatur der Speicherelemente liegt. Entsprechend geben die Speicherelemente die Energie wieder ab, wenn das durchströmende Gas kälter ist als die Speicherelemente. Schütttspeicher werden beispielsweise dazu eingesetzt, die Energie von Rauchgasen zu speichern, um diese dann für die Vorwärmung der Verbrennungsluft zu nutzen.

Latentwärmespeicher

Latentwärmespeicher nutzen die Energieänderungen, die mit einem Wechsel des Aggregatzustandes verbunden sind. In der Regel wechselt das Speichermaterial zwischen der festen und der flüssigen Phase. Bei Reinstoffen und eutektischen Mischungen findet dieser Wechsel innerhalb eines schmalen Temperaturbereichs statt. Mit der Wahl des Speichermaterials wird durch dessen Schmelztemperatur der Arbeitsbereich des Latentwärmespeichers festgelegt. Darüber hinaus müssen bei der Auswahl des Speichermaterials folgende Kriterien beachtet werden:

- Kosten bezogen auf Latentwärme
- Reversibilität des Phasenwechsels
- Kompatibilität mit eingesetzten Materialien für Rohre und Behälter
- Hygroskopizität
- Umweltverträglichkeit

Aufgrund dieser Kriterien wird die Anzahl der technisch einsetzbaren Materialien stark eingegrenzt. Metalle scheiden aufgrund von Kostenaspekten aus. Bei Latentwärmespeichern werden für den Temperaturbereich $T > 100^{\circ}\text{C}$ häufig Nitratsalze als Speichermaterialien eingesetzt. Diese weisen eine niedrige Wärmeleitfähigkeit ($\lambda < 1.0 \text{ W/(mK)}$) auf.

PCM	Schmelzpunkt [° C]	Dichte [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Schmelzenthalpie [kJ/kg]	Volumen spezifische Speicherdichte [kWh/m³]	Kapazitätsspez. Kosten Material [€/kWh]
$\text{KNO}_3\text{-NaNO}_2\text{-NaNO}_3$ (eutekt.)	142	2000	0.5	60	33	65
$\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3$ (eutekt.)	222	2000	0.5	100	55	28
LiNO_3	252	1800	0.6	360	180	60
NaNO_3	306	1900	0.5	175	96	14
Blei	327	11300	35	23	72	100

Tabelle 5.2: Latentwärmespeichermaterialien

Verschiedene Konzepte wurden entwickelt, um eine ausreichend hohe Leistungsübertragung zwischen dem Speichermaterial und dem Wärmeträgermedium zu gewährleisten. Bewährt hat sich dabei der Einsatz von berippten Wärmeüberträgern im Speichervolumen. Dabei werden Stahlrohre, in denen das Arbeitsmedium strömt, mit Rippen aus Aluminium oder Graphit versehen. Durch die Anzahl der Rohre und Rippen im Speichermaterial kann der Speicher an die Leistungsanforderungen angepasst werden. Die Temperaturdifferenz zwischen dem Arbeitsmedium und der Schmelztemperatur des Speichermedium hat einen wesentlichen Einfluss auf die übertragene Leistung, üblicherweise liegt diese Differenz bei $T = 5$ bis 10°C .

Latentwärmespeicher auf Basis berippter Wärmeüberträger wurden mit verschiedenen Speichermedien mit Schmelztemperaturen bei $T = 142\text{ °C}$, $T = 220\text{ °C}$ und $T = 305\text{ °C}$ erprobt und befinden sich derzeit in einem anwendungsnahen Entwicklungsstadium.

5.2.2 Einsatzoptionen für Energiespeicher

Latentwärmespeicher

Nutzung der Energie des Abdampfes für Latentwärmespeicher: Im Hinblick auf eine Steigerung der Energieeffizienz ergeben sich aus Bild 5.6 verschiedene theoretische Optionen. Anzustreben ist eine Nutzung des Abdampfes auch bei niedrigerem Druck. Eine Möglichkeit bietet sich hier in der Nutzung von Latentwärmespeichern. Bei derartiger Speichern wird bei der Beladung Wärme zum Aufschmelzen eines Speichermaterials genutzt, bei der Entladung geht das Speichermaterial unter Energieabgabe wieder in den festen Zustand über. Die Energieabgabe erfolgt während des Phasenwechsels des Speichermaterials bei konstanter Temperatur. Ein derartiger Latentwärmespeicher könnte so eingesetzt werden, dass während des Abfahrens Dampf im Speicher kondensiert wird. Vorteilhaft ist dabei, dass der Dampf im Speicher unter Energieabgabe kondensiert und damit ein Unterdruck erzeugt wird, durch den der Dampf aus dem abfahrenden Autoklaven abgesaugt wird. Die gespeicherte Energie kann dann eingesetzt werden, um in einem hochfahrenden Autoklaven die Energie im unteren Druckbereich zur Verfügung zu stellen. Wesentlich für die Auslegung eines Latentspeichers ist die Wahl des Speichermaterials in Abhängigkeit von der gewünschten Schmelztemperatur. Diese Schmelztemperatur sollte möglichst der Sattdampfdrucktemperatur entsprechen, bei der etwa 50% der Energie übertragen worden sind. Nach Bild 5.6 liegt dieser Punkt bei ca. $p_e = 3\text{ bar}$ Absolutdruck, bei einem Partialdruck von $p_e = 2\text{ bar}$ für die Wasserdampfphase entspricht dies einem Sollwert für die Schmelztemperatur des Latentspeichermaterials von ca. $T = 120\text{ °C}$. In diesem Fall könnte beim Abfahren Wasserdampf bis zu einer minimalen Temperatur von ca. $T = 125\text{ °C}$ für die Beladung genutzt werden. Für das Hochfahren eines anderen Autoklaven könnte der Speicher dann Dampf bis zu einer Temperatur von ca. $T = 115\text{ °C}$ zur Verfügung stellen. Durch den Einsatz eines derartigen Speichers könnten ca. 40% Energie von einem Zyklus auf einen nachfolgenden Zyklus übertragen werden [8 bis 16].

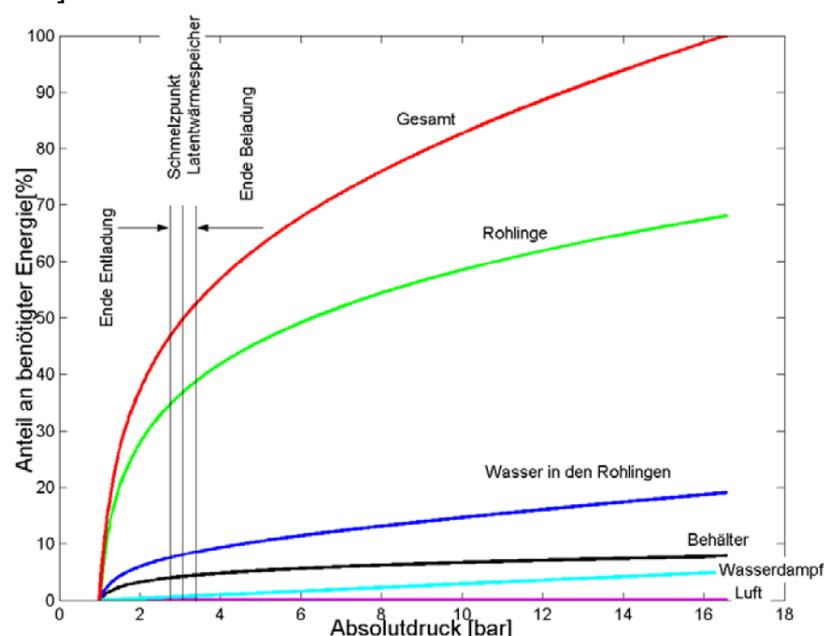


Bild 5.6: Nutzung Latentwärmespeicher zur Zwischenspeicherung von Abwärme

Thermoölspeicher

Eine weitere Möglichkeit bietet sich in der Nutzung von Thermoöl zur Aufnahme und Speicherung der Energie aus dem Abdampf. Dabei wird der Dampf in Thermoöl gekühlten Wärmeüberträgern kondensiert, das Thermoöl wird nach Aufnahme der Kondensationswärme in Behältern gespeichert. Gegenüber dem derzeitig praktizierten Überströmen von Abdampf könnte auch hier der minimale Druck, bei dem Abdampf noch genutzt werden kann, deutlich abgesenkt werden, da bei der Kondensation ein Unterdruck entsteht, durch den der Abdampf aus dem abfahrenden Autoklaven abgesaugt wird.

Entsprechend dem Temperaturverlauf des verfügbaren Abdampfes bietet sich eine Speicherung in mehreren Behältern entsprechend der Temperatur des Thermoöles an. Die Dampferzeugung erfolgt indirekt bei gleitendem Druck, im Wasservolumen des Dampferzeugers sind Wärmeüberträger integriert, die vom Thermoöl durchströmt werden, nur im oberen Temperaturbereich erfolgt einer Zufuhr von Energie durch Gas/Öl. Es ist anzunehmen, dass bei einem derartigen System ein großer Anteil der Abwärme genutzt werden könnte.

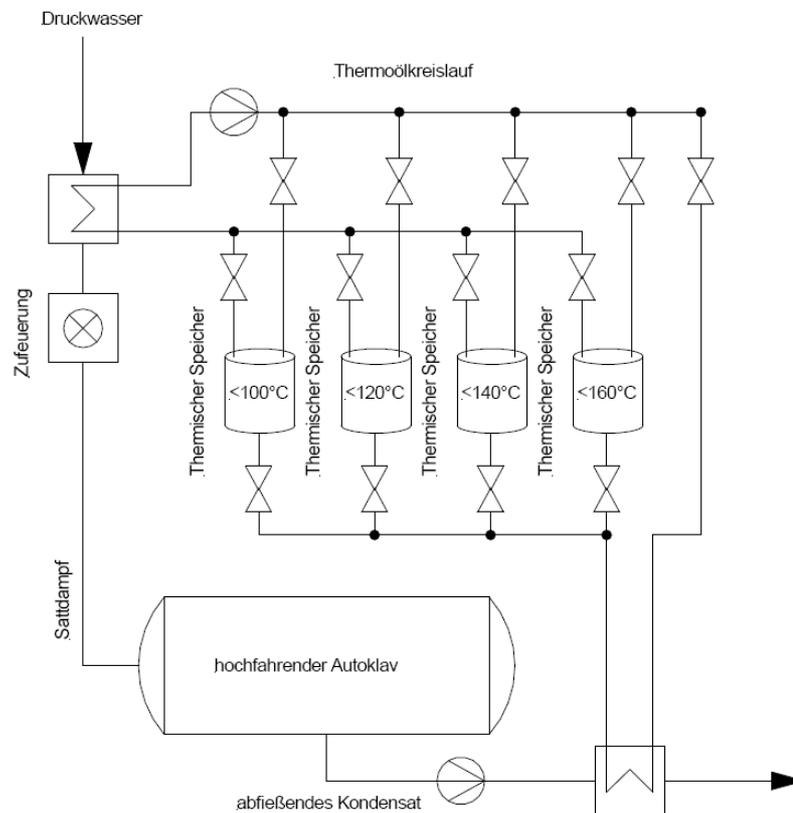


Bild 5.7: Vereinfachte Prinzipschaltung Autoklav mit Thermoölkreislauf

Einsatz von Autoklaven als Speicher

Sind im Kalksandsteinwerk Autoklaven verfügbar, die nicht für die Produktion benötigt werden, können diese als kostengünstige Speicher eingesetzt werden. Dabei bietet sich aufgrund der hohen volumetrischen Speicherdichte der Einsatz von Wasser innerhalb der Autoklaven an. Innerhalb des Autoklaven kommen drucklose Wasserbehälter zum Einsatz. Ist überschüssiger Sattldampf verfügbar, wird dieser dem Speicher-Autoklaven zugeführt und kondensiert an den Wasserbehältern.

Für eine bessere Wärmeübertragung zwischen Sattdampf und Wasser kann im oberen Bereich des Autoklaven ein Düsen-system angeordnet werden, über das das Wasser tröpfchenförmig in darunter angeordnete Behälter fällt. Bei der Entladung bildet sich Sattdampf, dessen Verdampfungsenergie dem Wasservolumen entzogen wird. Ein derartiges System bietet sich beispielsweise für die Speicherung thermischer Energie über das Wochenende an. Zu Wochenbeginn kann die Anlage dann schneller mit der gespeicherten Energie wieder auf Betriebstemperatur gebracht werden. Aufgrund der geringen Zyklenzahl ist für eine derartige Anwendung nur ein System mit sehr niedrigen Investitionskosten geeignet, um akzeptable Amortisationszeiten zu erreichen.

Achtung: Nutzungsänderungen sind mit den Aufsichtsbehörden abzustimmen. Auf eine eventuelle Korrosionsbildung ist zu achten.

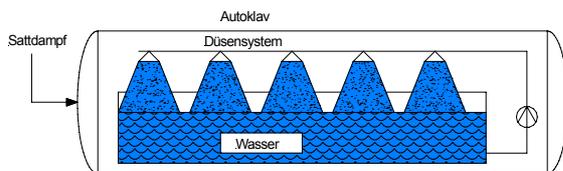


Bild 5.8: Autoklav als Speicher mit Wasserinventar, Beladefall

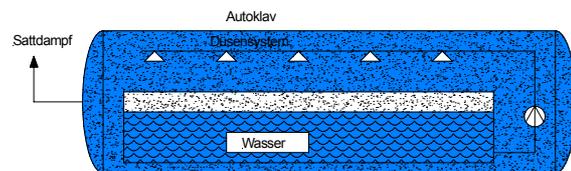


Bild 5.9: Autoklav als Speicher mit Wasserinventar, Entladefall

5.3 Rückgewinnung und Nutzung von Niedertemperaturenergie

Voraussetzung für eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz ist eine verstärkte Nutzung der Wärme im unteren Temperaturbereich. Wenn die Rohlinge nach Ende des Härteprozesses den Autoklaven mit $T = 100 \text{ °C}$ verlassen, so ist noch ca. 30 - 40 % der zugeführten Energie in den Steinen gespeichert. Beträgt der Partialdruck des Wasserdampfes $p_e = 1 \text{ bar}$, kann keine Auskopplung von Energie mehr über eine Rückverdampfung erfolgen. Eine Option bestünde darin, Unterdruck in einem Autoklaven zu erzeugen, in dem sich Rohlinge befinden. Wird dieser Autoklav mit einem zweiten Autoklaven verbunden, der gerade einen Härtezyklus durchlaufen hat, so würde in diesem zweiten Autoklaven durch eine Rückverdampfung auch bei Temperaturen unter $T = 100 \text{ °C}$ eine Rückverdampfung stattfinden, der entstehende Dampf würde zu den Rohlingen im ersten Autoklaven strömen und dort kondensieren. Voraussetzung dafür ist, dass ein ausreichendes Vakuum erzeugt werden kann und dass die Druckdifferenz zwischen den Autoklaven ausreichend hoch ist. Die Autoklavenbehälter müssen für Unterdruck geeignet sein (Druckringe), die Abdichtung der Deckel muss ausreichend sein, darüber hinaus muss der Energieaufwand für die Erzeugung des Vakuums berücksichtigt werden.

Als Alternative kann hier der Einsatz von feuchter Luft geprüft werden. In feuchter Luft können aufgrund von Kondensations- und Verdampfungsvorgängen höhere Wärmeübertragungsleistungen erreicht werden als in trockener Luft. Gegenüber Wasserdampf hat der Einsatz von feuchter Luft den Vorteil, dass die Wasserdampfphase bei Atmosphärendruck verdampfen und kondensieren kann, es sind daher weder Druck- noch Vakuumbehälter erforderlich.

Feuchte Luft wird dabei zunächst für die Vorwärmen der Rohlinge unter Atmosphärendruck bis auf eine Temperatur von $T = 100^{\circ}\text{C}$ eingesetzt, wobei zuvor gespeicherte Abwärme genutzt wird. Für diese Vorwärmung sind hier zwei beispielhafte Umsetzungen dargestellt: Vorwärmung im Autoklaven (Bild 5.10)

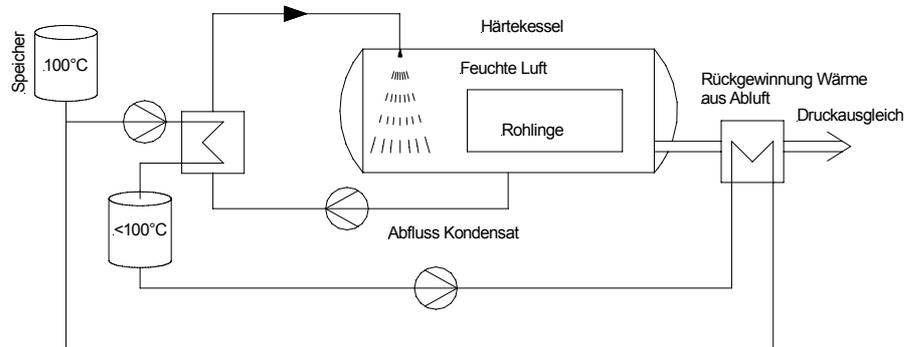


Bild 5.10: Schaltschema für Vorwärmung der Rohlinge im Autoklaven in Feuchtluftatmosphäre

Da die Vorwärmung unter Umgebungsdruck durchgeführt wird, können auch einfach aufgebaute Kammern eingesetzt werden, die Zeitdauer für die Vorwärmung kann dann ausgedehnt werden, die verfügbaren Autoklaven werden dann nur für die Produktionsschritte genutzt, bei denen die Rohlinge unter einer Druckbeaufschlagung stehen. Ein mögliches Schaltschema für eine derartige externe Vorwärmekammer zeigt Bild 5.11:

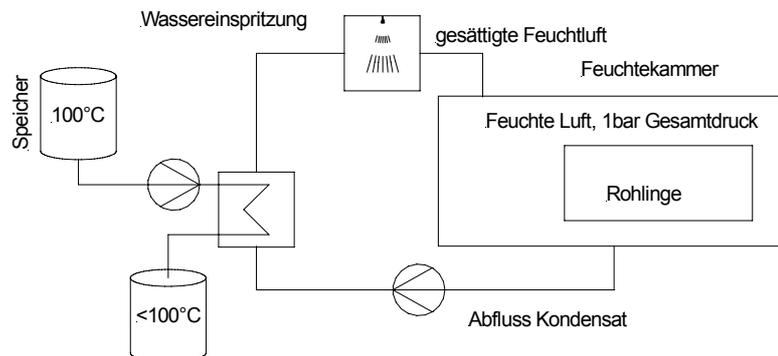


Bild 5.11: Schaltschema für Vorwärmung der Rohlinge in separaten Feuchtekammern

Wesentlich für dieses Verfahren ist auch die Nutzung der Restwärme in den Steinen nach Ende des Härtezyklus. Dazu werden die Steine nach Verlassen des Autoklaven in externen Kammern durch Überströmen mit Luft getrocknet, die Luft nimmt dabei Wasserdampf auf, die dafür erforderliche Verdampfungswärme wird den Rohlingen entnommen. Die Feuchtluft wird nach dem Verlassen der Kammer abgekühlt, der aufgenommene Wasserdampf kondensiert aus, die dabei freiwerdende Wärme gespeichert. Vorteilhaft ist dabei der Einsatz von kostengünstigen drucklosen Wasserspeichern. Von besonderem Interesse ist der Temperaturbereich zwischen $T = 80$ bis 100°C , da hier hohe Wasserbeladungen der Luft möglich sind und bereits geringe Abkühlungen der Feuchtluft zur Freisetzung von signifikanten Mengen an Kondensationswärme führen. Ziel der Trocknung ist einerseits eine teilweise Rückgewinnung der Energie, die in den Steinen nach Verlassen des Autoklaven gespeichert ist, andererseits ist eine geringere Feuchte auch für das Endprodukt vorteilhaft, da das Transportgewicht geringer ist und die Steine schneller ihr endgültiges Isolationsvermögen erreichen.

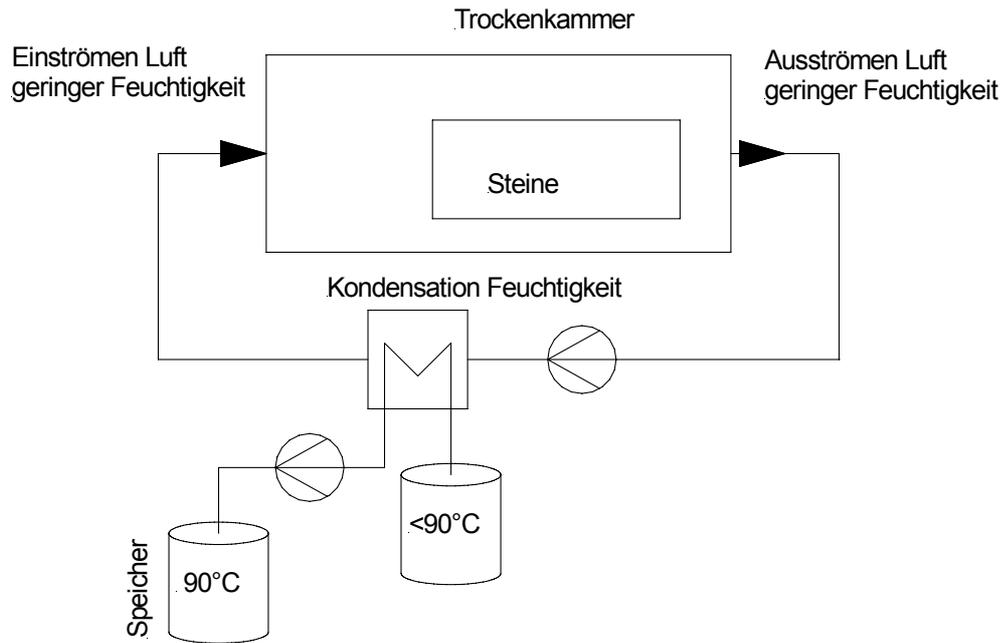


Bild 5.12: Trocknen der Steine nach Verlassen des Autoklaven zur Rückgewinnung der Restwärme

5.4 Nutzung von Abwärme

Die Nutzung von Abwärme umfasst zwei unterschiedliche Konzepte. Kalksandsteinwerke können Wärme für Verbraucher mit entsprechendem Wärmebedarf bereitstellen. Diese sollten sich möglichst in direkter Nachbarschaft zu dem Werk befinden. Denkbar wäre hier Industrie mit Bedarf für Energie für Trocknungsprozesse oder Gewächshäuser. Gewährleistet sein muss hier, dass die Bedarfsstruktur des Verbrauchers mit dem Abwärmeangebot zeitlich übereinstimmt. Der Transport thermischer Energie zu einem Verbraucher in mobilen Speichern ist in der Regel aufgrund der geringen Energiedichte nicht sinnvoll. Im Hinblick auf die Energieeffizienz muss gewährleistet sein, dass der energetische Aufwand für den Transport nicht die gespeicherte Energie überschreitet. Aus wirtschaftlicher Sicht müssen die Kosten für Personal und Infrastruktur mit dem Wert der transportierten Energie verglichen werden.

Der für den Härtingsprozess benötigte Prozessdampf könnte auch von einem Abwärmepfänger bereitgestellt werden, der die Abgase eines Dieselmotors oder einer Gasturbine nutzt. Aufgrund des schwankenden Dampfbedarfs der Autoklaven sollte hier ein Speicher integriert sein, der zeitliche Unterschiede zwischen Abwärmeangebot und Dampfbedarf ausgleicht.

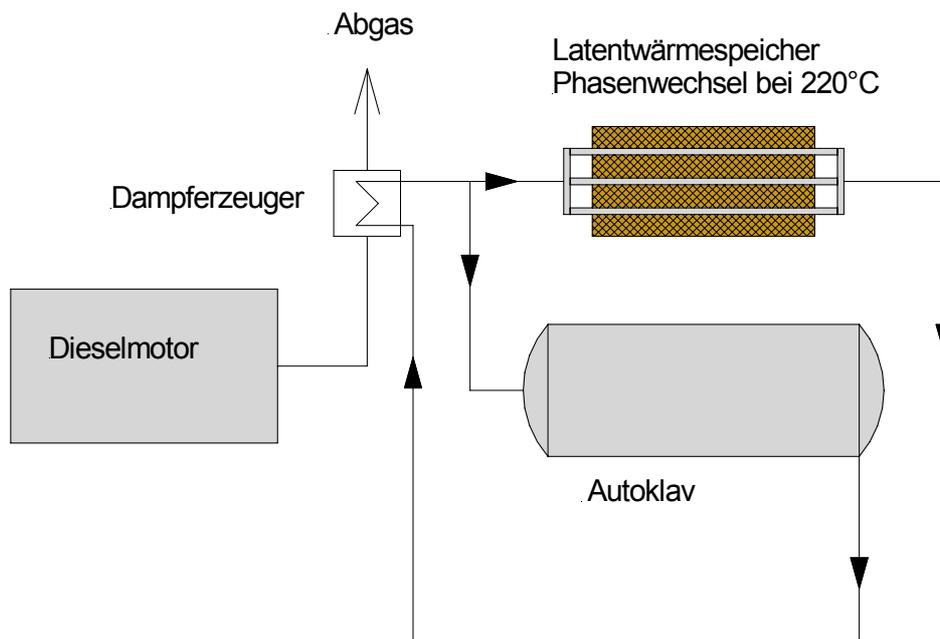


Bild 5.13: Vereinfachte Darstellung Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampferzeugung aus Abgasen mit Speicher zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen

Ein mögliche Umsetzung einer Kraft-Wärme-Kopplung zur Versorgung eines Kalksandsteinwerkes zeigt Bild 5.13. Der Dieselmotor erzeugt Abgase mit einer Temperatur von ca. $T = 450\text{ °C}$, die durch einen Abgasdampferzeuger geführt werden. Liegt der Dampfbedarf des Autoklaven unter der erzeugten Dampfmenge, wird der Überschussdampf dem Latentwärmespeicher zugeführt. Steigt der Dampfbedarf der Autoklaven über die vom Abgasdampferzeuger bereitgestellten Menge, wird zusätzlich Dampf vom Latentwärmespeicher bereitgestellt. Wichtig für die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung ist auch die Nutzung der Abwärme des Dieselmotors im unteren Temperaturbereich. Zusätzlich zu den Abgasen gibt der Motor über das Kühlwasser eine etwa gleich großen Energiemenge bei ca. $T = 90\text{ °C}$ ab. Diese Energie könnte für die Vorwärmung der Rohlinge genutzt werden.

Das Kalksandsteinwerk könnte auch die Abwärme eines benachbarten Industrieprozesses nutzen (Bild 5.14). Beispiele hierfür wären energieintensive Prozesse wie beispielsweise die Herstellung von Zement oder Kalk. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von Abwärmeströmen bei ausreichender Temperatur. Zeitliche Abweichungen zwischen Abwärmeangebot und Leistungsbedarf der Autoklaven könnten auch hier durch Speicher ausgeglichen werden. Würde die Abwärme der Kalksandsteinproduktion durch einen Niedertemperatur Wärmeverbraucher genutzt, könnte die Energieeffizienz weiter gesteigert werden.

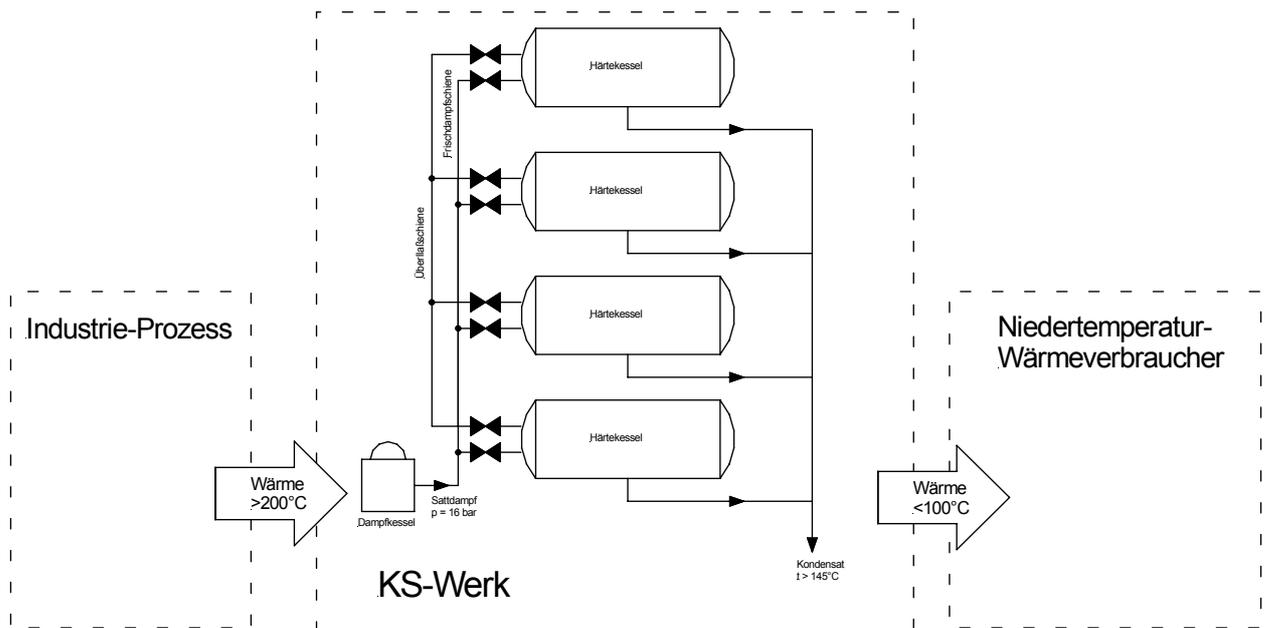


Bild 5.14: Nutzung von industrieller Abwärme durch Kalksandsteinwerk, Abgabe der Abwärme des Kalksandsteinwerkes an einen Niedertemperatur-Wärmeverbraucher

Ergänzende Hinweise zu Wärmekammern

Grundsätzlich sind auch Wärmekammern denkbar, in denen die Rohlinge durch die in fertig gehärteten Kalksandsteinen enthaltene Wärmeenergie vorgeheizt werden, wobei durch Zwangskonvektion der Wärmeübergang forciert werden könnte. Alternativ könnte durch Herabsetzung des Partialdruckes der Inertgase der Wärmeübergang deutlich erhöht werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass eine gemeinsame Kammer für Kalksandsteinrohlinge und fertig gehärtete Kalksandsteine logistisch und wirtschaftlich nur dann sinnvoll ist, wenn es gelingt, den konzeptionellen Werksaufbau entsprechend umzugestalten (Neuanlagen). Heutige Kalksandsteinwerke sind bezüglich der Abfolge der einzelnen Produktionsschritte linear aufgebaut: (Rohstoffaufbereitung-Dosieren-Mischen-Rohlingstransport-Pressen-Ausziehbühnen-Härten-Verpacken-Versand). Der Anlagenaufbau und die vorhandene Raumausnutzung erlauben bei derzeitigem Anlagenaufbau keinen wirtschaftlich sinnvollen Rücktransport der fertig gehärteten warmen Kalksandsteine zu den Rohlingen.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass es bei versehentlicher Verwendung von trockener bzw. zu trockener Luft zu Austrocknungseffekten bei den Rohlingen kommen kann, die zu negativen Auswirkungen auf die Produktqualität führt (Verfärbungen, Flecken). Folglich ist sicher zu stellen, dass die Luft für die Vorwärmkammern stets feucht genug ist.

5.5 Elektrische Energie:

Für den elektrischen Energiebereich wurden im Rahmen der Werksuntersuchungen folgende Ansätze für Einsparpotenziale gefunden:

- **Identifizierung unnötiger Verbräuche**
Beleuchtung, Leerlauf, Heizung, etc.
- **Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme**
Festgestellt wurde, dass Antriebe elektrischer Aggregate aus "Reservegründen" überdimensioniert sind. Daraus resultiert sowohl ein relativ hoher Blindleistungsbedarf als auch ein erheblicher Rückgang des Wirkungsgrades infolge geringer Auslastung. Für die Beurteilung und Auswahl von Energieeinsparmaßnahmen ist die Kenntnis der Leistungsaufnahme der verschiedenen Verbraucher erforderlich. Die Leistungsaufnahme der einzelnen Aggregate kann mit Hilfe von Zangenampèremetern durch eine Fachfirma bestimmt werden. Gegebenenfalls kann eine Anpassung vorhandener Antriebe an einen niedrigeren Leistungsbedarf durch eine Umschaltung von Dreieck- auf Sternbetrieb vorgenommen werden. Dazu ist auch aus Sicherheitsgründen eine Prüfung durch eine Fachfirma erforderlich.
- **Vermeidung von Leerlauf**
Insbesondere ist auch darauf zu achten, dass der Leerlauf von Maschinen mit einem erheblichen Stromverbrauch verbunden sein kann. Dies trifft vor allem auf Förderbänder zu.
- **Innerbetriebliche Überwachung**
Des Weiteren spielt die innerbetriebliche Überwachung des Energieverbrauchs eine wichtige Rolle. Die monatliche Stromrechnung sollte mit der Fertigung zu verglichen werden. Die Installation und Ablesung von Unterzählern kann zum rationellen Stromeinsatz beitragen.
- **Blindstromkompensation**
Neben den Kosten für Leistung und Wirkarbeit entstehen je nach Stromvertrag zusätzliche Kosten für den Blindstrombezug. Beim Blindstrom handelt es sich um den Anteil der Stromlieferung, der nicht nutzbar ist. Mögliche Quellen für Blindstrom sind induktive Verbraucher, die ein Magnetfeld aufbauen, z.B. Elektromotoren, Transformatoren oder Leuchtstofflampen. Der Blindstrom pendelt zwischen Generator/Energieversorger und Verbraucher im Takt der Netzfrequenz und belastet elektrische Versorgungseinrichtungen. Hier kann mit geeigneten Blindstromkompensationsanlagen gegengesteuert werden.
- **Lastspitzenbegrenzung**
Eine weitere Möglichkeit der Reduzierung der Stromkosten ist der Betrieb einer Lastspitzenbegrenzung. Der gleichzeitige Start von Aggregaten mit hohen Anlaufströmen wird in diesem Fall unterbunden. Dazu ist eine Maximumüberwachungseinrichtung erforderlich, die beim Überschreiten eines eingestellten Grenzwertes der Leistung ein Signal gibt oder eventuell selbst Abschaltungen vornimmt. Die Häufigkeit des Auftretens hoher Leistungen und ihre zeitliche Aufeinanderfolge ist zweckmäßigerweise vorher durch Aufzeichnen des Leistungsganges über eine ausreichend lange Betriebsperiode vorzunehmen.

- **Frequenzumrichter und Sanftanlaufsteuerungen**

Ein Frequenzumrichter ist ein elektronisches Gerät, das aus einem Wechselstrom (auch Drehstrom) mit bestimmter Frequenz eine in Höhe und Frequenz veränderte Spannung erzeugt. Mit dieser umgerichteten Spannung wird dann der Verbraucher betrieben. Frequenzumrichter werden zur elektronischen Drehzahlverstellung bei Antrieben eingesetzt und sind in der Industrie weit verbreitet. Sie gestatten den Einsatz von preiswerten Normmotoren in einem weiten Drehzahlbereich. Unter anderem werden Frequenzumrichter für einphasige Wechselstrommotoren angeboten, um bereits vorhandene Motoren nachträglich in der Drehzahl zu regeln. Der Energieeinspareffekt liegt darin, dass durch eine geregelte Drehzahländerung ein stark Energie verbrauchender Vollastbetrieb bzw. ein sofortiges Anfahren auf die maximale Drehzahl vermieden wird. Die Investitionskosten sind zwar höher als die entsprechenden mechanischen Schalter. Die Mehrkosten lassen sich jedoch in vielen Anwendungen durch Energieeinsparungen in absehbarer Zeit amortisieren. Nur richtig ausgewählte Frequenzumrichter können energieeffizient arbeiten. Die Auslegung richtet sich nach der Motorleistung [kW] und dem Nennstrom [A]. Frequenzumrichter bedürfen einer fachgerechten Installation. In jedem Falle sind die Angaben des Herstellers zu berücksichtigen. Bei direktem Einschalten kann in manchen Fällen der Anlaufstrom das Zehnfache des Motornennstromes erreichen, in Verbindung mit einem Mehrfachen des Motornennmoments. Auch mit einem Sanftanlaufgerät (sog. "Softstarter") kann ein Energie sparendes sanftes Starten und Stoppen eines Elektromotors erreicht werden. Gleichzeitig wird die Mechanik durch eine gleichmäßige Drehzahlerhöhung erheblich weniger beansprucht. Der Motorstart verläuft fast ruckfrei.

6 ANSÄTZE ZUR ANLAGENOPTIMIERUNG

Kalksandsteinwerke auf Basis des heutigen Grundkonzeptes bieten nur noch ein begrenztes Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz. Wesentliches Hemmnis ist der große Anteil an Wärme, der nach Ende des Härteprozesses in den Steinen verbleibt und bisher nicht genutzt wird. Gegenüber einem Betrieb mit einmaligem Überströmen konnte durch mehrfaches Überströmen keine Verbesserung nachgewiesen werden. Bei der ursprünglichen Entwicklung des heutigen Grundprozesses stand die Gewährleistung der erforderlichen Produktqualität im Vordergrund, Energieeffizienz war seinerzeit lediglich von untergeordneter Bedeutung. Durch entsprechende Modifikationen kann der Energiebedarf erheblich reduziert werden, dafür sind jedoch Änderungen erforderlich, die sich häufig nur bei Neuanlagen realisieren lassen.

Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sollen hier in drei Gruppen dargestellt werden entsprechend dem Zeithorizont, in dem dieser Maßnahmen umgesetzt werden können

6.1 Kurzfristige Maßnahmen

Kurzfristige Maßnahmen erfordern nur geringe Investitionen und lassen sich an bestehenden Kalksandsteinwerken bei begrenzten Eingriffen in den Produktionsablauf realisieren, das Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz ist allerdings beschränkt. Zu diesen Maßnahmen gehören:

- Reduzierung von Wärmeverlusten der Rohlinge nach dem Pressen. Durch geeignete Abdeckungen beim Transport bzw. durch eine Minimierung der Zeitspanne zwischen Pressen und Beginn des Härtezyklus soll eine möglichst hohe Temperatur der Rohlinge bei Beginn der Härtung erreicht und damit die erforderliche Temperaturspanne bei der Härtung verringert werden kann.
- Minimieren der Wärmeverluste des Autoklavenbehälters nach Ende des Härtezyklus. Zügiges Ausladen der fertigen Steine, Reduzieren der thermischen Verluste durch flexible Vorhänge an den Öffnungen der Autoklaven, die Luftströmungen aus dem Inneren des Autoklaven verringern.
- Einsatz von Autoklaven als Energiespeicher. Die Energieeffizienz zu Wochenbeginn könnte gesteigert werden, wenn Abwärme von der vorangegangenen Woche für das Vorwärmen der Anlage genutzt werden könnte. Aufgrund der vergleichsweise geringen Zyklenzahl kommen hierfür nur Energiespeicher mit niedrigen Investitionskosten in Betracht. Durch die Nutzung von Autoklaven, die nicht für die Produktion benötigt werden, könnte hier eine kostengünstige Realisierung erfolgen. Als Speicher genutzte Autoklaven sollten dabei mit drucklosen Wasserbehältern beladen werden, um die volumetrische Speicherkapazität zu erhöhen.
Achtung: Nutzungsänderungen bei Druckbehältern und peripheren Anlagenkomponenten sind stets mit den zuständigen Aufsichtsbehörden abzustimmen.

6.2 Mittelfristige Maßnahmen

Mittelfristige Maßnahmen erfordern Ergänzungen des bestehenden Prozesses. Durch Integration zusätzlicher Komponenten kann die Energieeffizienz gesteigert werden. Diese Maßnahmen können sowohl bei bestehenden als auch bei Neuanlagen eingesetzt werden. Die erwarteten Verbesserungen sind größer als bei den kurzfristigen Maßnahmen, die erforderlichen Investitionen sind allerdings auch höher. Zu diesen Modifikationen zählen

- Einsatz von Latentwärmespeichern zur Zwischenspeicherung von Abwärme. Wird ein Latentwärmespeicher mit einer Phasenwechseltemperatur von ca. $T = 125\text{ °C}$ in die Anlage integriert, kann damit etwa 30 - 40 % der Energie eines abfahrenden Autoklaven aufgenommen werden. Diese Energie kann dann einem hochfahrenden Autoklaven zugeführt werden. Vorteilhaft ist dabei die zeitliche Entkopplung von Abwärmeeinfall und Bedarf, wodurch eine verbesserte Nutzung der Abwärme ermöglicht wird.
- Einsatz von Thermoölspeichern. Werden Thermoölspeicher auf unterschiedlichem Temperaturniveau eingesetzt, kann Abwärme aus einem abfahrenden Autoklaven in größerem Umfang genutzt werden. Die gespeicherte Wärme kann beim Entladen der Thermoölspeicher auf unterschiedlichem Temperaturniveau bereitgestellt werden und kann damit dem beim Hochfahren eines Autoklaven erforderlichen Temperaturprofil besser angepasst werden.
- Ein- und Auskoppeln von Wärme im Niedertemperaturbereich über feuchte Luft unter Atmosphärendruck. Wesentliches Merkmal der hydrothermalen Härtung ist die Wärmeübertragung über Kondensations- und Verdampfungsvorgänge mit entsprechend hohen Leistungsdichten. Wird in Vorwärmkammern trockene Luft als Wärmeübertragungsmedium eingesetzt, müssen hohe Volumenströme gefördert werden um signifikante Leistungen zu erreichen. Eine Alternative bietet hier der Einsatz von feuchter Luft bei Temperaturen von $T = 80$ bis 100 °C . Hier können in kostengünstigen drucklosen Kammern höhere Wärmeübertragungsraten erreicht werden, es ist daher auch eine Ausnutzung der in den fertigen Steinen gespeicherten Energie möglich.

6.3 Langfristige Maßnahmen

Langfristige Maßnahmen erfordern umfangreiche Änderungen gegenüber dem bisherigen Grundprozess. Eine Anwendung bietet sich vor allem bei Neuanlagen an. Von diesen Änderungen werden die maximalen Verbesserungen der Energieeffizienz erwartet. Die Kombination mit den zuvor genannten Maßnahmen ermöglicht die Minimierung des Energiebedarfs. Zu den langfristigen Maßnahmen zählen:

- Einsatz von Kraft- Wärmekopplung für die Grundversorgung mit Strom und Prozessdampf. Die Abgase von Verbrennungsmaschinen wie Gasmotoren oder Gasturbinen könnten für die Dampferzeugung genutzt werden. Ein thermischer Energiespeicher kompensiert Bedarfsschwankungen der Autoklaven. Die Niedertemperaturwärme der Verbrennungsmaschine könnte für die Vorwärmung der Rohlinge genutzt werden.
- Nutzung von Abwärme anderer Industrieprozesse bzw. Abgabe von Abwärme an Niedertemperaturverbraucher. Bei zahlreichen Industrieprozessen fällt Abwärme im für die hydrothermale Härtung relevanten Temperaturbereich an, für die häufig keine wirtschaftlich attraktive Nutzungsmöglichkeit vorliegt. In Kombination mit den zuvor dargestellten Maßnahmen könnte der Bedarf an fossiler Energie für das Kalksandsteinwerk minimiert werden. Bei der Verfügbarkeit von Speicherkapazität könnten Fluktuationen im Abwärmeangebot ausgeglichen werden. Vorteilhaft wäre auch die Abgabe der Abwärme des KS-Werkes an benachbarte Niedertemperaturverbraucher.

6.4 Abschätzung der Kosteneinsparung

In der nachfolgenden Tabelle 6.1 wird ein Überblick über die oben aufgeführten Maßnahmen zur Energieeinsparung gegeben. Die Maßnahmen weisen unterschiedliche Potenziale zur Energieeinsparung auf. Der jeweilige Umfang der Energieeinsparung hängt von der Ausgangseffizienz eines Werkes ab sowie von der Anzahl und Dauer der Produktionszyklen. Die Investitionskosten von Speichersystemen hängen von der benötigten Speicherkapazität ab. Die Minimierung dieser Speicherkapazität erfordert eine optimale zeitliche Abstimmung des Speichersystems und der Härteessel. Die Investitionskosten hängen auch vom erforderlichen Umfang der Modifikationen an der bestehenden Anlage ab. Berücksichtigt werden muss dabei auch das jeweilige Entwicklungsstadium der verschiedenen Konzepte und die teilweise erforderlichen Änderungen im Verlauf des Herstellungsprozesses. Zur groben Orientierung werden in der Tabelle 6.1 Abschätzungen für das Einsparpotenzial und die erforderlichen Investitionen gegeben. Dabei wird für den Ausgangswert des spezifischen Energieverbrauchs vereinfachend ein Wert von 100 kWh/t Kalksandstein angenommen, die Jahresproduktion soll beispielsweise bei 80.000 t liegen, woraus sich ein Energiebedarf von 8 Mio. kWh pro Jahr ergibt. Für die Abschätzung der eingesparten Energiekosten wird ein spezifischer Wärmepreis von 0,06 €/kWh angenommen.

Konzept	Energie-Einsparpotenzial (Beispiel) [%]	Investitionskosten (Beispiel, grobe Schätzung) [€]	Jährliche Kosteneinsparung [€]
Ruths-Speicher	20	150.000,-	96.000,-
Latenwärme-Speicher	30	250.000,-	144.000,-
Kaskadierter Thermoöl-Speicher	50	400.000,-	240.000,-
Autoklav als Speicher	10	50.000,-	48.000,-
Vorwärmung Rohlinge im Autoklaven	5	Beeinflussung Produktionszyklus	24.000,-
Vorwärmung Rohlinge in Feuchteammern	25	150.000,-	120.000,-
Abdeckung Rohlinge nach dem Pressen	10	50.000,-	48.000,-
Flexible Vorhänge an den Autoklavenöffnungen	5	40.000,-	24.000,-

Tabelle 6.1: Abschätzung des Einsparpotenzials, der Investitionskosten und der Kosteneinsparung für die verschiedenen Konzepte zur Energieeinsparung

Beim Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung sowie bei der Abgabe von Restwärme an externe Verbraucher ergibt sich der wirtschaftliche Vorteil nicht aus der Einsparung, sondern aus der Veräußerung von Energie. Eine Abschätzung der Kostenvorteile kann hier nur im Einzelfall unter Berücksichtigung der Tarifstruktur sowie der konkret erforderlichen Investitionen erfolgen, die insbesondere bei externen Wärmeverbrauchern stark variieren können.

7 LITERATUR

- [1] Bundesverband Kalksandsteinindustrie eV: Mengenmäßiger Betriebsvergleich 2006/2007, Interne Studie, Hannover, 2007
- [2] BRIEL VAN, A.; EDEN, W.; MÜLLER, H.; WOLFRAM, S.: Maßnahmen zur Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion, Forschungsbericht Nr. 104 der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover 2007
- [3] Umwelt-Produktdeklaration für Kalksandsteine nach ISO 14025, Deklarationsnummer: EPD-BKS-2009111-D, Institut Bauen und Umwelt e.V., erstellt durch: PE-International, Leinfelden-Echterdingen, 2009
- [4] DIN EN ISO 14040: 2006-10, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006 / DIN EN ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 2006
- [5] DIN EN ISO 14044:2006-10, Umweltmanagement - Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044: 2006 / DIN EN ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, 2006
- [6] PCR-Dokument Kalksandstein: Regeln für die Umwelt-Produktdeklaration – Kalksandstein, AUB, 2004
- [7] GaBi 4: Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. LBP, Universität Stuttgart und PE International, 2001-2009.
- [8] GaBi 4: Dokumentation der Datensätze der Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung. LBP, Universität Stuttgart und PE International, <http://documentation.gabisoftware.com/index.html>, 2009
- [10] EDEN, W.: Handbuch zur Herstellung von Kalksandsteinen, 3. Auflage, Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover 2002
- [11] HAGMANN, J.: Kollektoren und Wärmekraftmaschinen - Potenzialstudie und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung', Präsentation Workshop: Solarthermische Kraftwerke im kleinen und mittleren Leistungsbereich, Fraunhofer ISE Freiburg, 2008
- [12] GOLDSTERN, W.: Steam Storage Installation, Pergamon Press, Oxford, 1970

8 ANHANG

8.1 Anhang A: Bilder, Diagramme und Tabellen

Bestandsaufnahme Werksdaten für Modellwerk DLR 31.05.2010	Einheit	Festgelegte Modellparameter
Vom Technischen Ausschuss des BVKSI festgelegte Daten		
Dampferzeuger:		
Leistung:	t/h	10
Dampf: pe = 16 bar, T = 203 °C	bar	16
Kalksandsteinpressen: 2 Stück	Stück	2
Härtewagen: Doppelwagen l = 2,62 m b = 2,40 m		
10 Wagen pro Härtekessel	Stück	10
Masse pro Härtewagen	kg	930
Autoklaven:	Stück	8
Durchmesser:	m	2,40
Volumen:	m ³	123
Masse: m = 50 t	t/h	50
Ausgangstemperaturen zu Beginn der Autoklavenreise:		
Temperatur der Autoklaven: T = 60 °C	°C	60
Temperatur der Härtewagen: T = 20 °C	°C	20
Temperatur der Rohlinge: T = 40 °C	°C	40
1. Verbrauchsdaten:		
Verbrauch kWh pro Tonne Kalksandsteinmaterial für die Wochentage Mo/Di/Mi/Do/Fr	kWh	siehe Diagramme
Außentemperatur bei der Produktion	°C	15
Temperatur der Steine beim Einfahren in den Autoklaven	°C	30
Vorgehensweise nach Öffnen des Autoklaven		
- Sackkessel oder Durchzugkessel		Durchzugkessel
- Wartezeit der Rohlinge vor dem Schließen der Autoklaven	min	120
- Dauer des Beladungsvorgangs	min	dito
- Dauer des Entladungsvorgangs	min	30
2. Daten zum Dampferzeuger:		
Anzahl		1
Typ		Loos, Jumey, Standardkessel
Brennstoffart (Heizöl EL oder Erdgas)		Heizöl EL oder Erdgas
Baujahr		
Masse	kg	22000
Zulässiger Betriebsüberdruck	bar	18
Wandstärke	mm	12
Nennleistung	MW	10
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%	9
Taktung des Dampferzeugers (Verbrauchszähler Datenlogger?)		
Economizer vorhanden?	kW	ja
Economizer Abgastemperatur vorher	°C	210
Economizer Abgastemperatur nachher	°C	140
Economizer Speisewassereingangstemperatur	°C	125
Economizer Speisewasserausgangstemperatur	°C	140
Dampfmengenmesser vorhanden? Lastprofil ermitteln		nein
Art der Speisewasseraufbereitung (Teil- oder Vollentsalzung, z.B. Umkehrosmose)		
Rohwasseranalyse		
Brunnenwassertemperatur	°C	
Speisewassermenge (Heißwasserzähler)	m ³	
Speisewassertemperaturen über die komplette Kette der Wasseraufbereitung...	°C	
...bis zum Dampfkessel ins Fließschema eintragen.		
	m ³	
Speisewassereintrittstemperatur nach dem Entgaser	°C	
Produzierte Dampfmenge, wenn Dampfmengenzähler vorhanden, sonst berechnen.	kWh	
Dampfentemperatur aus Druck ableiten. Sattedampf wird angenommen	°C	
Gas- / Ölverbrauch, Lastgang	kWh	
Anteil Gebäudeheizung	%	
Masse	t	
Thermische Leistung	MW	
Thermische Leistung - Dampfmenge	t/h	
Wassertemperatur am Abend bzw. zum Schichtende	°C	140
Wassertemperatur am Morgen bzw. Schichtanfang	°C	125
Wasservolumen	m ³	25
Verluste an die Umgebung bei Betriebstemperatur	%	Literatur: 0,6
Wird der Kessel bei Nacht gefahren?		ja
Wird der Kessel übers Wochenende gefahren?		nein
Fließschema Dampferzeugung - Dampfentzug (hier Daten eintragen)		siehe Rohrleitungspläne
3. Daten zur Dampfschiene:		
Anzahl der parallelen Rohre an den Autoklaven (Frischdampf, Überlassdampf, Kondensat)		1 x Frischdampf DN 125 2 x Überlassdampf DN 150 1 x Abdampf DN 200 1 x Kondensat DN 100
Volumen der Rohre	m ³	6
Durchmesser der Rohre	cm	s.o.
Wandstärke der Rohre	mm	5
Können alle Rohre sowohl für die Frischdampfzufuhr als auch für das Überleiten genutzt werden		ja
Gibt es eine Wasserabscheidung aus der Dampfschiene		ja
4. Autoklaven:		
Oberflächenverluste in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zur Umgebung		???
		siehe Rohrleitungsplan
Dicke der Isolierung	cm	150
Sind die Armaturen isoliert		ja
Sind die Deckel isoliert	mm	ja
5. Kondensatrückführung:		
Aufbau der Kondensatrückführung Bitte Zeichnung zusenden.		siehe Rohrleitungsplan
Sammelbehälter Volumen	m ³	2 x 50
Speisewasservorwärmung durch Wärmeenergie aus Kondensat mittels Wärmetauscher		ja

Tabelle A1: Festgelegte Modellparameter

Bestandsaufnahme Werksdaten für Modellwerk DLR 17.05.2010	Einheit	Werk 1	Werk 2	Werk 3	Werk 4	Werk 5	Werk 6	Werk 7	Werk 8	Festgelegte
Festgelegte Daten für das Modellwerk										
* Dampferzeuger:										
o Leistung: 10 t Dampf/h (entspricht etwa 6,1 MW)	t/h									10
o Dampf: pe = 16 bar, T = 203 °C	bar									16
* Kalksandsteinpressen: 2 Stück										2
* Härtewagen: Doppelwagen l = 2,62 m b = 2,40 m										
o 10 Wagen pro Härtekessel										10
o Masse pro Härtewagen	kg									930
* Autoklaven: 8 Stück										8
o Durchmesser: Ø = 2,40 m	m									2,4
o Volumen: V = 90 m ³ l = 27,4 m	m ³									90
o Masse: m = 38 t	t/h									38
* Ausgangstemperaturen zu Beginn der Autoklavenreise:										
o Temperatur der Autoklaven: T = 60 °C	°C									60
o Temperatur der Härtewagen: T = 20 °C	°C									20
o Temperatur der Rohlinge: T = 40 °C	°C									40
1. Verbrauchsdaten:										
Verbrauch kWh pro Tonne Kalksandsteinmaterial für die Wochentage Mo/Di/Mi/Do/Fr	kWh	siehe Tabelle	siehe Tabelle	siehe Tabelle	siehe Tabelle	siehe Tabelle		XL: 100-108 K+M: 95	siehe Tabellen	siehe Diagramme
Außentemperatur bei der Produktion	°C	Wetterdienst	Wetterdienst	Wetterdienst	Wetterdienst	10-18		15-20	12	15
Temperatur der Steine beim Einfahren in den Autoklaven	°C				35-40	35		40	21	30
Vorgehensweise nach Öffnen des Autoklaven										
- Sackkessel oder Durchzugkessel		Durchzugkessel	Durchzugkessel	Sackkessel	Durchzugkessel	Sackkessel: 6 x 2,40m und 11 x 2,00m		Sackkessel	Sackkessel	Durchzugkessel
- Wartezeit der Rohlinge vor dem Schließen der Autoklaven	min							120-180	60-120	120
- Dauer des Beladungsvorgangs (je nach Anzahl der beteiligten Pressen und Formate)	min	50	50	73	120-240	60-180		120-180	60-120	ditto
- Dauer des Entladungsvorgangs	min	15	10	25	2 x 5	30		40	5	30
2. Daten zum Dampferzeuger:										
Anzahl		1	1	1	1	1		1	1	1
Typ		Jumey	Loos	Standardskessel	Jumey	Loos		Loos/ Weishaup/ Kombibrenner	Jumey	Loos, Jumey, Standardskessel
Brennstoffart (Heizöl EL oder Erdgas)					Erdgas	EL		Erdgas Öl		Heizöl EL oder Erdgas
Baujahr					1994	1993		1994		
Zulässiger Betriebsüberdruck	bar				20	20 bar		20 bar		18
Masse der Dampferzeuger	kg					?		39100		22000
Wandstärke	mm							12		12
Nennleistung	MW					6,13 MW 10 t/h		4,7 MW 6t/h	11,8 MW 18t/h	10
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	%							9		9
Taktung des Dampferzeugers (Verbrauchszähler Datenlogger?)						nur Ölzähler vorhanden		geht nicht		
Economizer vorhanden?	kW				471				ja	ja, Jumey
Economizer Abgastemperatur vorher	°C					Kein Economizer eingebaut		210		210
Economizer Abgastemperatur nachher	°C					Kein Economizer eingebaut		140		140
Economizer Speisewassereingangstemperatur	°C				114	Kein Economizer eingebaut		unterschiedlich	127	125
Economizer Speisewasserausgangstemperatur	°C				141	Kein Economizer eingebaut		unterschiedlich	148	140
Dampfmengenmesser vorhanden? Lastprofil ermitteln					nein	nicht vorhanden		nein		
Art der Speisewasseraufbereitung (Teil- oder Vollentsalzung, z.B. Umkehrosmose)					Umkehrosmose	Umkehrosmose		Vollentsalzung		
Rohwasseranalyse					nein	vorhanden		nein		
Brunnenwassertemperatur	°C				20	ca. 5°C		nein		
Speisewassermenge (Heißwasserzähler)	m ³					nicht vorhanden		siehe Kurven		
Speisewassertemperaturen über die komplette Kette der Wasseraufbereitung, ...	°C							siehe Kurven		
... bis zum Dampfkessel ins Fließschema eintragen.										
Speisewasservorratsbehälter	m ³					10m ³		NDSW-Behälter = 14m ³ Ruths Speicher = 50m ³ beide ca. 70% gefüllt, Ruths-Speicher außer Betrieb		
Speisewassereintrittstemperatur nach dem Entgaser	°C					kann festgestellt werden		siehe Kurven		
Produzierte Dampfmenge, wenn Dampfmengenzähler vorhanden, sonst berechnen.	kWh					?		siehe Kurven		
Dampfentemperatur aus Druck ableiten. Sattdampf wird angenommen	°C					16 bar Druck 200°C		siehe Kurven		
Gas- / Ölverbrauch, Lastgang	kWh					nur Ölzähler vorhanden		siehe Kurven		
Anteil Gebäudeheizung	%				5	elektr. Heizung		ist separat erfasst		
Masse	t/h				15				39,1	23
Thermische Leistung	MW				7,93				12	3,8
Thermische Leistung - Dampfmenge	t/h				12				18	
Wassertemperatur am Abend bzw. zum Schichtende	°C				141	90-120				182
Wassertemperatur am Morgen bzw. Schichtanfang	°C				125	120				140
Wasservolumen	m ³				25,49	17,3 bei NW 12,7		26,85-35,5	12,2	25
Verluste an die Umgebung bei Betriebstemperatur					???	???		???		0,6 % laut Literatur
Wird der Kessel bei Nacht gefahren?					ja	bei 12 bar		ja, 3-schichtig		ja
Wird der Kessel übers Wochenende gefahren?					nein	nein		ja, bei 13 bar		abstellen Sa 8:00
Fließschema Dampferzeugung - Dampfentzug (hier Daten eintragen)						vorhanden		vorhanden		nein

Tabelle A2: Datensätze aus den Kalksandsteinwerken

3. Daten zur Dampfschiene:										
Anzahl der parallelen Rohre an den Autoklaven (Frischdampf, Überlassdampf, Kondensat)										
6	Volumen der Rohre	m ³				1 x Frischdampfleitung 2 x Überleitrohre 1 x Abdampfleitung 1 x Restdampfleitung	4 parallele Leitungen	1 x Frischdampf 2 x Überlassdampf 1 x Abdampf 1 x Kondensat	1 x Frischdampf 2 x Überlassdampf 2 x Restdampf 2 x Speicher	1 x Frischdampf DN... 2 x Überlassdampf DN... 1 x Abdampf DN... 1 x Kondensat DN...
	Durchmesser der Rohre	cm				2 DN100	4,3	Abdampf: 168 mm Überleitdampf: 114 mm Frischdampf: 139 mm	9,6	s. o.
	Wandstärke der Rohre	mm				5	5	8 bis 9	4	5
	Können alle Rohre sowohl für die Frischdampfzufuhr als auch für das Überleiten genutzt werden					ja	3 Rohre zum Überlassen verwendbar	nein, daher 2 x FD	ja	ja
	Gibt es eine Wasserabscheidung aus der Dampfschiene					ja	nein	ja, mehrere	ja	ja
4. Fragen zu den Autoklaven:										
Oberflächenverluste in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zur Umgebung										
	Absperroorgane zur Sammelschiene					1 x Handabspernung 1 x motorisch		ja	siehe Rohrleitungsplan	siehe Rohrleitungsplan
	Dicke der Isolierung	cm						150	150	150
	Sind die Armaturen isoliert							ja	ja	ja
	Sind die Deckel isoliert	mm					ja	ja	100	ja
5. Fragen zur Kondensatrückführung:										
Aufbau der Kondensatrückführung Bitte Zeichnung zusenden.										
	Sammelbehälter Volumen	m ³				siehe Rohrleitungsplan	siehe Rohrleitungsplan	2 Stück à 2 m ³	2 x 100	2 x 25
	Speisewasservorwärmung durch Wärmeenergie aus Kondensat mittels Wärmetauscher		ja	nein	ja		ja	ja	ja	ja
6. Mischer/Reaktor										
	Anzahl					1	3	1		
	Typ					Teka	1 Dorstener, 2 Krupp	Eirich		
	Baujahr					1994	1982, 1972	wird nachgereicht		
	Leistungsaufnahme	kW				200	SKW, 8KW, 8KW	wird nachgereicht		
7. Pressen										
	Anzahl					4	3	3		
	Typ					Lasco: 2 x 801, 2 x 850	HDP 800, HDP 1200, Dorsa 2000	Atlas UP 650/ Henke		
	Baujahr					1994	1988, 1994, 2004	wird nachgereicht		
	Leistungsaufnahme	kW				4 x 150		wird nachgereicht		
	Stempelheizung (Fahrweise und Temperatur)	°C				durchlaufend	vorhanden	2x ja/ 1x nein		
	Massenausstoß Anzahl der Stückformate						kann festgestellt werden nach Format			
8. Härtekessel										
	Sackkessel oder Durchzugkessel					Durchzugkessel	Sackkessel	Sackkessel		
	Beschickung der Autoklaven mit KS-Masse, Formate	t				Kleinformate: 30-40 min XL; 10 min	kann festgestellt werden nach Format	siehe Stapelbilder bzw. Produktionsbericht		
	Wartezeit der Rohlinge von den Autoklaven	min					kann festgestellt werden nach Format	ca. 20 min		
	Pressfeuchte	M.-%				5	zwischen 3 bis 5 %	ca. 4,5%		
	Temperatur der Rohlinge (außen, innen im Stapel)	°C				40		ca. 30-50°C		
	Anzahl der Härtekessel					16	17	7x D=2,0; 1x D=2,2		
	Volumen der Härtekessel (Länge, Durchmesser)	m ³				V=125000m ³ L = 32,5m D = 2,20m	V= 84200, 58100 L= 18m Durchmesser= 2,4 bzw 2 m	7x D=2,0 - L= 17,5m/ 1x D=2,2 - L = 20,0m		
	Anzahl und Masse der Härtewagen					12 x Doppelwagen m = 11	7 pro Autoklav Masse ?	siehe Datenbank		
	Anzahl der Stapel pro Autoklav						kann festgestellt werden je Format	siehe Stapelbilder		
	Wandstärke, Masse der Autoklaven	kg					Wandstärke= 19mm bzw. 16mm	ca. 20 t		
	Dicke der Dämmung	cm				100	120 mm	100 mm		
	Temperatur der Autoklaven während der Kesselfahrt (Scheitel-Sohle)	°C					kann festgestellt werden	siehe Kurven		
	Kondensatmenge	m ³					Nicht meßbar	nicht feststellbar		
	Kondensattemperatur	°C					Keine feste Temperatureinrichtung	siehe Kurven		
	Druck- und Temperaturverlauf der Autoklaven aus der...	°C / h					Kann ausgedrückt werden.	siehe Kurven		
	...automatischen Dampfsteuerungsanlage (Datenbank Härtekurven)		Automatik	Handsteuerung	Automatik	Automatik		siehe Kurven		
	Temperatur der gehärteten Kalksandsteine (außen, innen im Stapel)	°C				80	mußte man messen	180°C		
	Größe des freien Dampftraums berechnen	m ³				8 Vol.-%	mußte man berechnen	möglich, je nach Format		
	Befüll- bzw. Entleerungszeit der Härtekessel	min					abstoppen	Befüllen: ca. 1,0-1,5 h Entleeren: ca. 30 min		
	Überlassen bis	bar				3				
9. Rohrleitungssystem										
	Zustand					15 Jahre alt, teilweise undicht		Isoliert		
	Armaturen					16 Jahre alt, teilweise undicht		Kondensat, Ablass- und Frischdampf neu.		
	Isolierung	cm				80-100mm	50 bis 100 mm	Überlass reparaturbedürftig		
								Rohre komplett/ Armaturen teilweise		
10. Produktion										
	Produktionsplan							siehe Kurven		
	Produzierte Steinmasse	t						siehe Kurven		
	Produzierte Formate							siehe Kurven		
	Kalkverbrauch	M.-%				7,5		7,8 M.-%		
	Art des Kalkes (CL80/CL90)					CL 90	CL 90	CL90		

Tabelle A2: Datensätze aus den Kalksandsteinwerken

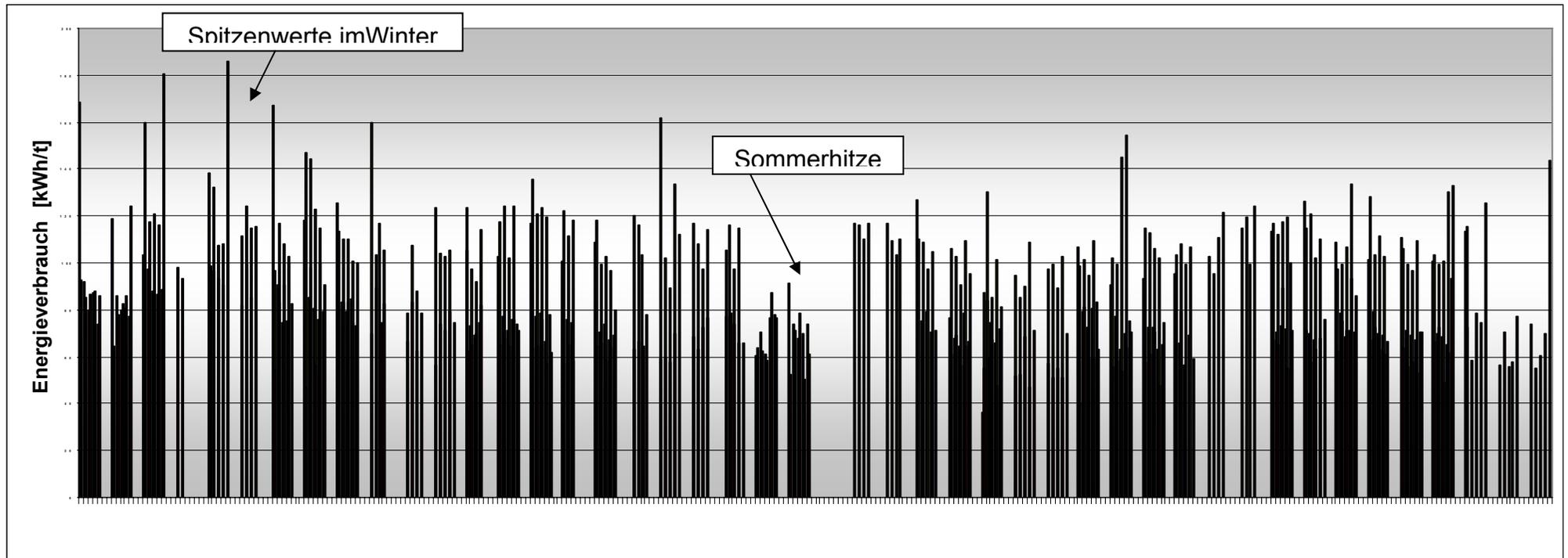


Bild A1: Jahrgang der Energieverbräuche von 3 in die Untersuchungen einbezogenen Kalksandsteinwerken in 2009

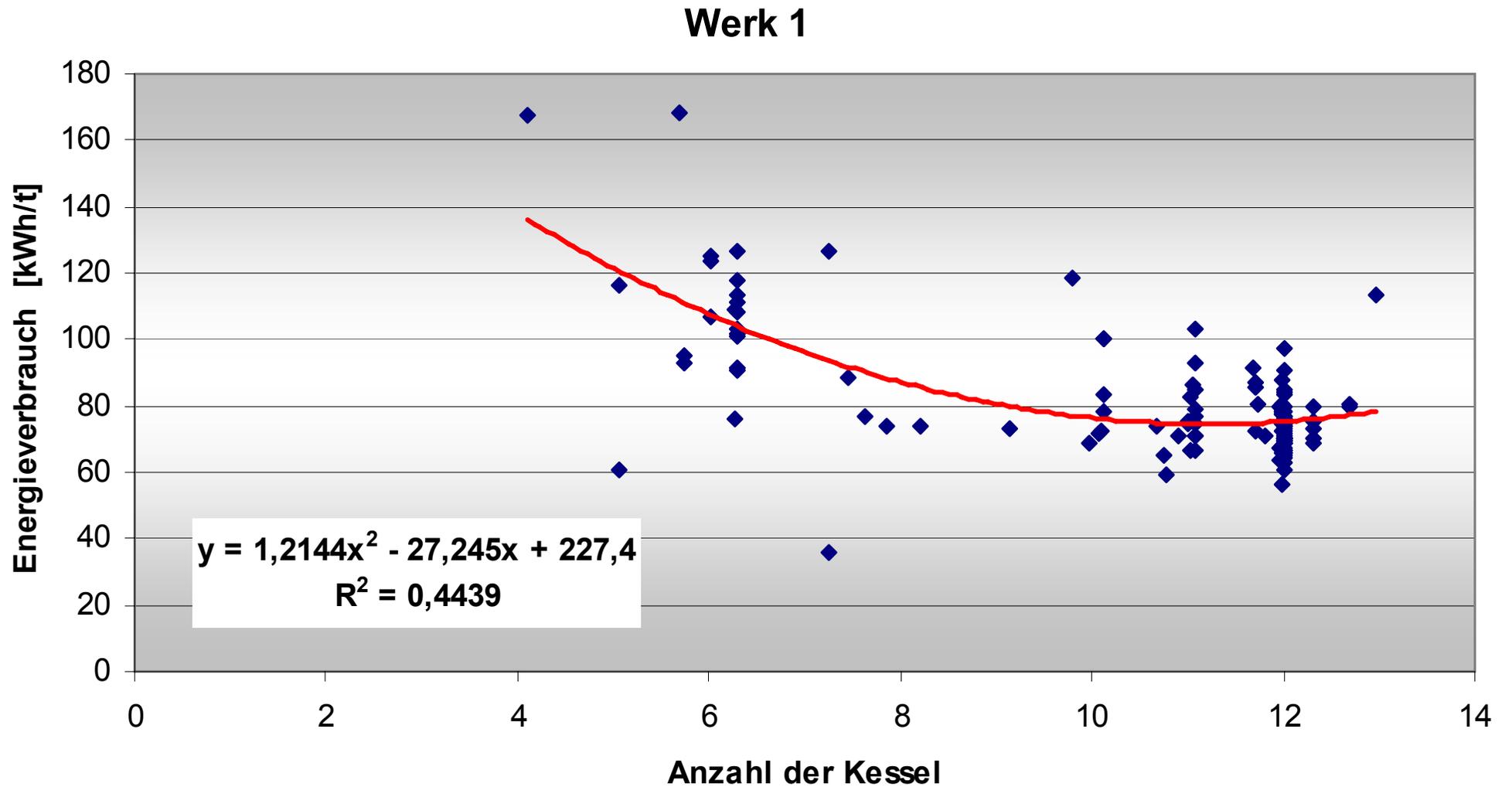


Bild A2: Streuungen bei der Gegenüberstellung der Größen "Anzahl der verwendeten Kessel" und "Energieverbrauch"
 Kalksandsteinwerk 1 in 2009

Werk 2

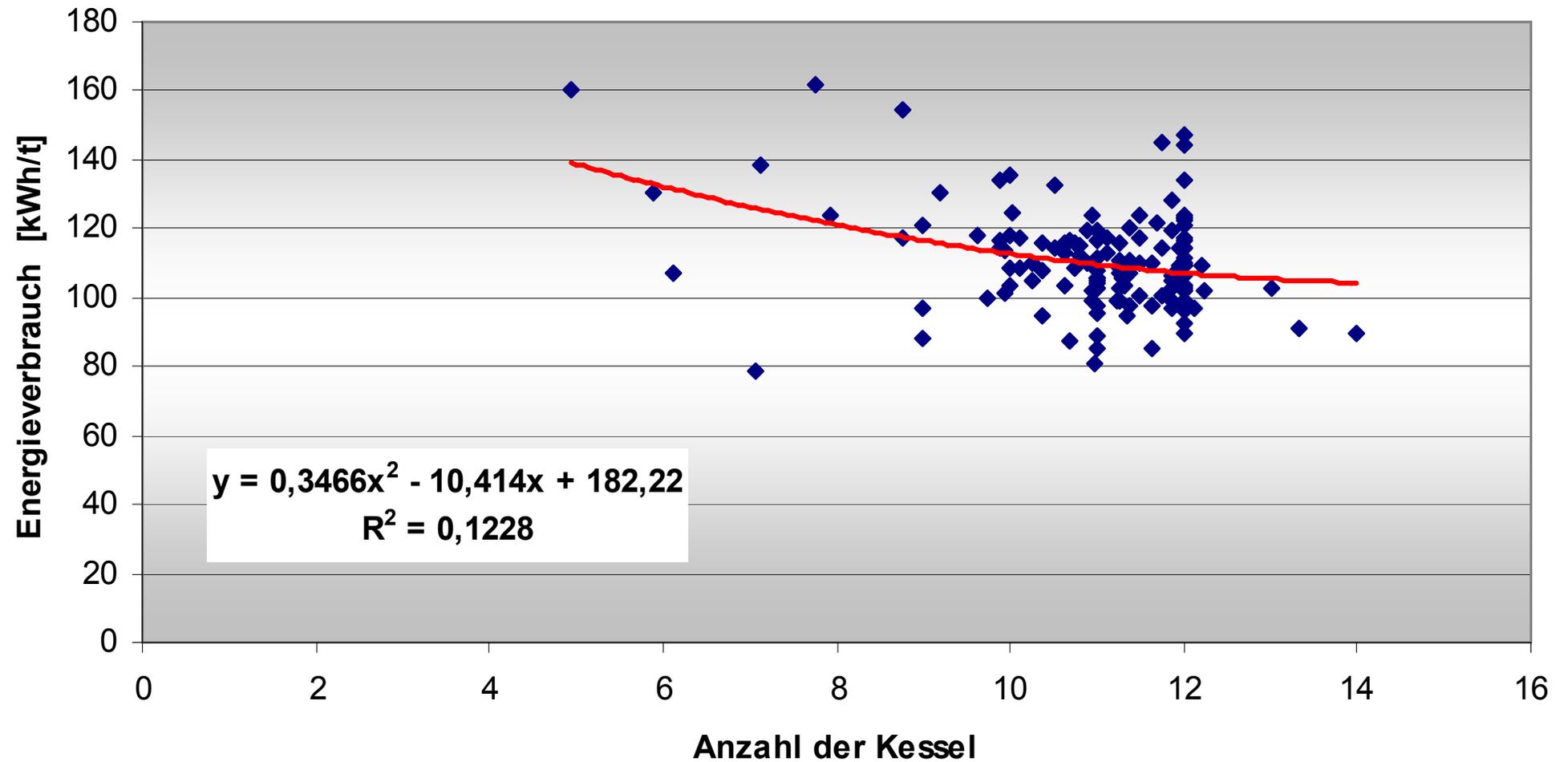


Bild A3: Streuungen bei der Gegenüberstellung der Größen "Anzahl der verwendeten Kessel" und "Energieverbrauch" Kalksandsteinwerk 2 in 2009

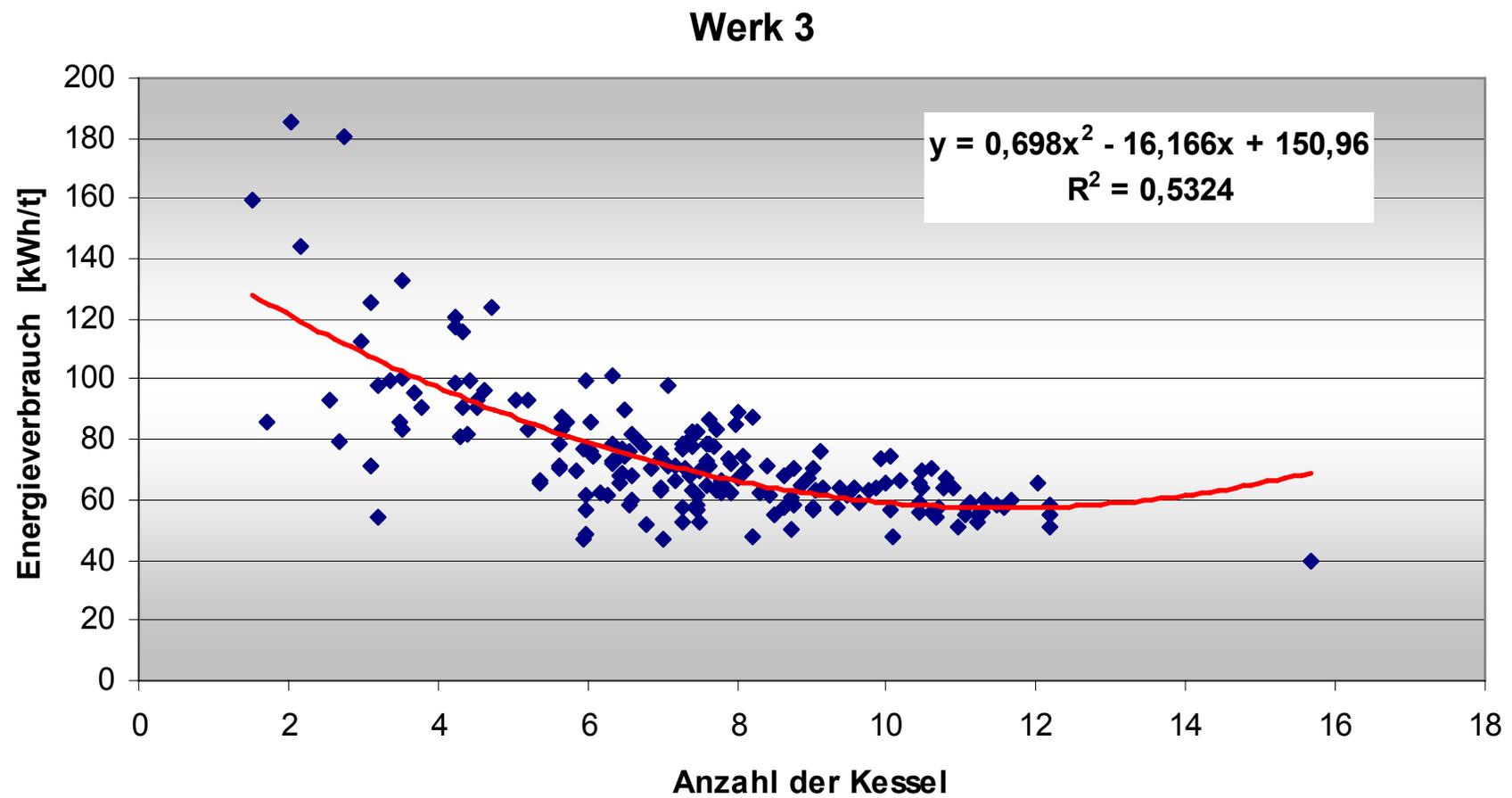


Bild A4: Streuungen bei der Gegenüberstellung der Größen "Anzahl der verwendeten Kessel" und "Energieverbrauch" Kalksandsteinwerk 3 in 2009

8.2 ANHANG B: Liste der Forschungsberichte der Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV

Untersuchung über den Einfluss von zwei verschiedenen Nachmischern auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	1	Sept. 1967
Der Einfluss der Oberpressung auf die wichtigsten Eigenschaften industriell gefertigter Kalksandsteine <i>Dr. H.-U. Oppermann</i>	2	Sept. 1967
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksandprodukten, Ziegeln und Betonsteinen gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (I) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	3	Sept. 1967
Untersuchungen über Ausblühungen und Verfärbungen von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	4	Sept. 1967
Eine Untersuchung über den Einfluss des Körnungsaufbaus von Sanden auf die Schwindung von Kalksandsteinen <i>J. M. Coldrey</i>	5	Nov. 1967
Eine Untersuchung über die Entstehung von Kalkschleiern auf Kalksandsteinen während der Herstellung <i>J. M. Coldrey</i>	6	Nov. 1967
Der Einfluss von Huminstoffen auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinen <i>W. Ziechmann, W. Rochus, Dr. H.-U. Oppermann</i>	7	Jan. 1968
Das Bindemittelskelett hydrothermal gebundener Kalk-Kieselsäure-Massen (I) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	8	1968
Anleitung zur Messung der Rohlingsstandfestigkeit im Betrieb <i>Dr. H.-U. Oppermann</i>	9	Mai 1968
Untersuchung über die Abschirmwirkung von Kalksand-spezialprodukten gegen Gammastrahlung und Neutronenstrahlung (II) <i>Dr. R. Hochstetter</i>	10	Nov. 1968
Ein Beitrag zur Bestimmung und Beeinflussung der Haftfestigkeit von Kalksandsteinen und Mörtel <i>P. Thormann</i>	11	Nov. 1968
Der Einfluss karbonatischer Bindung auf die Eigenschaften hydrothermal erhärteter Kalk-Kieselsäure-Massen im System $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$ <i>Dr. W. Gormann</i>	12	März 1969
Der Wasserdampfdiffusionswiderstand von Kalksandsteinen <i>Dr. R. Hochstetter</i>	13	März 1969

Kleiner Atlas der Sandeigenschaften der westdeutschen Kalksandsteinindustrie Dr. H.-U. Oppermann	14	Juni 1969
Die Beziehung zwischen einigen Gefügeeigenschaften von Kalksandsteinen und der Schwindung Dr. R. Hochstetter	15	Aug. 1969
Die laufende Qualitätskontrolle von Kalken mit Hilfe der Nasslöschkurve Dr. H.-U. Oppermann	16	Sept. 1969
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (I) Dr. R. Hochstetter	17	April 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (II) Über den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kalksandsteinen Untersuchungen über physikalische Eigenschaften von Kalksandsteinen. Dr. R. Hochstetter	18	Mai 1970
Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksandsteinen H. Lehmann, E. Rauschenfels	19	Juni 1970
Fachwörter-ABC und Veröffentlichungen 1956 - 1970 der Kalksandsteinforschung Dr. H.-U. Oppermann	20	Aug. 1970
Die Verwendung von Industrieabfallprodukten. Ihr Einfluss auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen (III) Dr. R. Hochstetter	21	Aug. 1970
Klebemörtel für Kalksandsteine Dr. H.-U. Oppermann	22	Sept. 1970
Außenanstriche auf Kalksandstein (I) Dr. H.-U. Oppermann	23	März 1971
Über die Bildung und Eigenschaften von Huminstoffen. Die analytische Charakterisierung von Sandvorkommen unter besonderer Berücksichtigung der Bestimmung postmortaler organischer Stoffe (Huminstoffe) W. Ziechmann, W. Rochus	24	März 1971
Die Wassergehaltsmessung von Sanden und Kalksandmischungen W. Lück	25	April 1972
Außenanstriche auf Kalksandstein (II) Dr. H.-U. Oppermann	26	April 1972
Löslichkeit von Quarz (I) Dr. R. Hochstetter	27	Mai 1972
Gezielte Produktion von hochwertigen Kalksandsteinen aus fraktionierten Rohstoffen Dr. H.-U. Oppermann	28	April 1973

Sandbevorratung und Sandhomogenisierung in der Kalksandsteinindustrie Dr. H.-U. Oppermann, H.-J. Weddig	29	Juni 1973
Das Austrocknungsverhalten von Gasbeton bei unterschiedlicher Lagerungsart Dr. H.-U. Oppermann, Dr. R. Hochstetter	30	Jan. 1974
Die Löslichkeit von Quarz (II) Dr. R. Hochstetter	31	Febr. 1974
Außenanstriche auf Kalksandstein (III) Dr. H.-U. Oppermann	32	März 1974
Die Löslichkeit von Quarz III Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. R. Hochstetter, Dr. W. Thomas	33	Nov. 1974
Beitrag zur Eigenschaftsuntersuchung von Kalksand-systemen, hergestellt bei hohen Temperaturen u. Drücken Dr. A. Hakim	34	Jan. 1975
Die heterogenen Eigenschaften großformatiger Kalksandblöcke Dr. F. Kendel	35	April 1975
Einfluss der Kornzusammensetzung des Sandes auf das Verformungsverhalten von Kalksandsteinen Dr. W. Thomas	36	Mai 1975
Der Einfluss von anorganischen Schadstoffen auf die Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	37	Dez. 1975
Gefügeveränderungen von Kalksandsteinen durch Frost-Tau-Beanspruchungen Dr. A. Hakim	38	Dez. 1975
Gemeinschaftsforschung der Kalksandsteinindustrie 1966 - 1975 Dr.-Ing. W. Gormann	39	Febr. 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil I: Betriebsgefertigte Steine Dr. W. Thomas	40	Juli 1976
Zugfestigkeit von Kalksandsteinen Teil II: Einfluss ausgewählter Herstellungsparameter, Untersuchungen an Prismen Dr. F. Kendel	41	Nov. 1976
Hochfestes KS-Mauerwerk Trag- und Verformungsverhalten Dr. W. Thomas	42	Nov. 1976
Der Einfluss verschiedener Kalke auf die Eigenschaften von Kalksandprodukten Dr. F. Kendel, Dr.-Ing. B. Oppermann, Dr.-Ing. U. Wittneben	43	Dez. 1976

Der Einfluss der Rauigkeit von Kalksandsteinen auf den Haftverbund Stein/Mörtel Dr. J. E. Quincke	44	April 1977
Modell für die Beziehungen zwischen Bindemittelaufbau und technischen Eigenschaften von KS-Produkten Dr.-Ing. W. Gormann	45	Dez. 1977
Dampfhärtung von Kalksandstein bei verlängerter Härtezeit und niedrigeren Temperaturen - Einfluss auf die Steineigenschaften Dr. F. Kendel	46	Febr. 1978
Der Einfluss des Brenngrades des Kalkes auf das Schwindverhalten von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	47	Juni 1978
Gutachtliche Stellungnahme zur Frage des Deponieverhaltens von Fabrikationsabfällen der Kalksandsteinindustrie	48	Okt. 1978
Zur Einführung von Formfaktoren bei der Druckfestigkeitsprüfung von Kalksandsteinen Prof. Dr. K. Kirtschig, Dipl.-Ing. D. Katen, Dr. Ing. R. Cordes, Dr. J. E. Quincke	49	Juni 1979
Optimierung von Zugfestigkeit, Schwindung und Frostbeständigkeit von Kalksandsteinen bei Härtetemperaturen von 175 °C bis 250 °C Dr. F. Kendel	50	Jan. 1980
Das Dampfdiffusionsverhalten von Kalksandstein-Außenwandkonstruktionen Dipl.-Ing. M. Prepens, Dr.-Ing. R. Cordes, unter beratender Mitwirkung von Prof. W.-H. Pohl	51	Mai 1980
Gutachtliche Stellungnahme zur Abwassersituation in der Kalksandsteinindustrie	52	Sept. 1980
Einfluss von Nebenmineralen des Sandes auf die mechanischen Eigenschaften von Kalksandsteinen Dr. F. Kendel	53	Sept. 1981
Stromverbrauch in der Kalksandsteinindustrie K. F. Ebersbach, A. Fischer, W. Steinberger	54	März 1982
Betriebstechnische Hinweise zum Einfluss von Änderungen der Rohstoffe und der Betriebsbedingungen auf die Steineigenschaften. Untersuchung zur Bestimmung der Wasseraufnahme von Mauersteinen durch Saugen am Beispiel von Kalksand-Lochsteinen und Loch-Ziegeln. Herstellung von Kalksandsteinen der Rohdichteklasse 2,0 und größer. Untersuchung über die Dampfkondensation in Rohlingen während der Härtekesselfahrt. Dr. J. E. Quincke	55	März 1982
Wirtschaftlichkeit des Dampfenergiebedarfs bei der Herstellung von Kalksandsteinen K. F. Ebersbach	56	April 1982

Eignung von verzögerten Werk-Frischmörteln für Mauerwerk Dr.-Ing. R. Cordes, Dr.-Ing. D. Kasten, Dipl.-Ing. W. Krohn, Dr. J. E. Quincke	57	April 1983
Gutachtliche Stellungnahme zur Frage der Wassersituation in der Kalksandsteinindustrie aus technischer und rechtlicher Sicht	58	Mai 1983
Substitution üblicher Quarzsande bei der Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	59	Juli 1984
Thermische Spannungen in Wärmedämmverbundsystemen Dipl.-Ing. D. Nannen, u. Prof. Dr.-Ing. habil. K. Gertis	60	Aug. 1984
Zur Belastung, Beanspruchung und Arbeitsgestaltung beim Vermauern großformatiger Kalksandsteine Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau	61	Aug. 1984
Verblendschalen aus Kalksandsteinen - Beanspruchung, rissfreie Wandlänge, Hinweise zur Ausführung Dr.-Ing. D. Gasten, Dr.-Ing. P. Schubert	62	März 1985
Dampfkondensation und Rückverdampfung während des Kalksandstein-Härtungsprozesses im Autoklaven Dr.-Ing. U. Wittneben	63	März 1985
Anfall und Verbleib von technischem Abwasser der Kalksandsteinfertigung - Gutachtliche Stellungnahme zur Direkt- und Indirekteinleitung	64	Mai 1985
Verbesserung der Stein- und Rohlingseigenschaften durch geringe Mineralzusätze Dr.-Ing. U. Wittneben	65	Juni 1985
Produktionstechnische Maßnahmen zur Optimierung der Mörtelhaftung auf Kalksandsteinen Dr.-Ing. U. Wittneben	66	März 1986
Zur Verbesserung des Schwindverhaltens von Kalksandsteinen durch Ausfallkörnungen Dr.-Ing. U. Wittneben	67	Sept. 1986
Möglichkeiten zur Reduzierung des Kalk- und Energiebedarfes bei der Kalksandsteinherstellung durch Zusatz von Flugasche Dr.-Ing. U. Wittneben	68	Febr. 1988
Einfluss der Vermauerungsart und der Knotenpunkt-ausbildung auf die Längsschalldämmung von Kalksandsteinwänden Dr.-Ing. E. Veres	69	Juni 1988
Untersuchungen zu Raumbeständigkeitsprüfungen als Beurteilungskriterium von Kalken für die Kalksandsteinherstellung Dr.-Ing. U. Wittneben	70	Okt. 1988

Verwertung technischer Nebenprodukte bei der Herstellung von Kalksandsteinen Sande aus Kraftwerken und Gießereien - Dr.-Ing. U. Wittneben	71	April 1989
Feuchtigkeitsabhängige Sperrwirkung von Kunstharzputzen H. Böhm, H. Künzel	72	Sept. 1989
Frost- und Witterungsbeständigkeit von Anstrichen und Imprägnierungen auf Kalksandstein-Sichtmauerwerk Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	73	Jan. 1990
Kostenoptimierung der Kalksandstein-Technologie unter Berücksichtigung notwendiger Produkteigenschaften - Flugaschen Prof. Dr.-Ing. U. Ludwig, Dipl.-Ing. H. Nelskamp, Dr.-Ing. P. Schubert	74	März 1991
Verbesserung der Frostwiderstandsfähigkeit, der Tausalzbeständigkeit und der Duktilität von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Prof. Dr.-Ing. M. Prepens	75	Dez. 1991
Nutzung der KS-Technologie für die Verarbeitung von Abfallstoffen Dipl.-Ing. H. Nelskamp	76	März 1992
Frostbeurteilung von Kalksandsteinen Grundlagen des DIN 106-Prüfverfahrens Dipl.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. D. Kasten, Drs. P.D. Rademaker	77	Mai 1993
Ermittlung der Druckfestigkeit von Kalksandstein-Mauerwerk unter Berücksichtigung der Beeinflussung der Mörtel­eigenschaften in der Fuge durch den Wasserhaushalt des Verbundsystems Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer	78	Sept. 1993
Maßnahmen und Zusatzmittel zur gezielten Verbesserung verschiedener Eigenschaften von Kalksandsteinen für hochbeanspruchte Bauteile Dipl.-Ing. W. Eden	79	Juni 1994
Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess, KS-Recycling Teil I Dipl.-Ing. W. Eden	80	Aug. 1994
Biegezug- und Zugtragfähigkeit von unbewehrtem und bewehrtem Kalksandsteinmauerwerk Dr.-Ing. P. Schubert, Dipl.-Ing. U. Meyer	81	Aug. 1995
Ökobilanz für den Baustoff Kalksandstein und Kalksandstein-Wandkonstruktionen Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ök. T. Kaczmarek, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer. pol. H. Zapf, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann, AGIMUS Umweltberatungsgesellschaft, Braunschweig	82	Nov. 1995

Untersuchung der Materialeigenschaften von Kalksandsteinen in Verbindung mit Mörtel nach DIN 1053 unter Hochtemperaturbeanspruchung als Grundlage für brand-schutztechnische Nachweise Dipl.-Ing. Ch. Hahn	83	Dez. 1995
Mineralische Zusammensetzung von Sanden für die Kalksandstein-Herstellung Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. E. Eberhard	84	Jan. 1996
Einsatz von Fasern bei der Herstellung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dr. H. Mörtel	85	März 1996
Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinmauerwerk mit anhaftenden Resten von Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe, KS-Recycling Teil II Dipl.-Ing. W. Eden	86	Juni 1997
Einfluss der Fugendicke und der Verbandsregeln auf die Druckfestigkeit von Kalksandsteinmauerwerk, Mittelbettmörtel Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden,	87	Juli 1997
Reduzierung der Produktionskosten und des Primärenergieverbrauchs durch Optimierung der Rezeptur der KS-Rohmischung und der Rohlingsstandfestigkeit Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. B. Mankowski, Dipl.-Wirtsch.-Ing. G. Waltermann	88	Nov. 1998
Einfluss von schweren Zuschlägen auf die Eigenschaftswerte von Kalksandsteinen, sehr hohe Rohdichten Dipl.-Ing. W. Eden, Chem.-Ing. E. Hörster	89	Juli 1999
Einfluss der Unterbrechung des hydrothermalen Härteprozesses auf die Qualitätseigenschaften, optimale Härtung von Kalksandsteinen Dipl.-Ing. W. Eden	90	Juli 2000
Hinweise zur Kosten- und Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Mitglieder des Technischen Ausschusses	91	Mai 2001
Herstellparameter von Kalksand-Spezialbaustoffen für die Abschwächung von Wärmebrücken im Mauerwerksbau, KS-ISO-Kimmstein Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	92	Feb. 2002
Ermittlung der Biegezugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge von Kalksand-Plansteinmauerwerk - insbesondere Kellermauerwerk Dipl.-Ing. S. Brinkmann, Dipl.-Ing. W. Eden Dipl.-Ing. T. Hanold, Dipl.-Ing. G. Meyer	93	Mai 2002
Erhöhung der Schubtragfähigkeit von KS-Wänden unter Erdbebenlasten durch schlaff bewehrte Betonstützen in Formsteinen bzw. durch Vorspannung der Wand Prof. Dr. A. Ötes, Dipl.-Ing. S. Löring Dipl.-Ing. B. Elsche	94	Mai 2002

Ermittlung und Verifizierung schalltechnischer Grundlagendaten für Wandkonstruktionen aus Kalksandstein-Mauerwerk auf der Grundlage neuer europäischer Normen des baulichen Schallschutzes Prof. Dr.-Ing. H. M. Fischer, Dipl.-Ing. S. Blessing M.Sc. Dipl.-Ing. M. Schneider, Dipl.-Ing. M. Späh	95	Mai 2002
Ermittlung der Einflussparameter des Verformungsverhaltens von Kalksandsteinen, Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. G. Meyer, Dr. rer nat H. Mörtel, Dr.-Ing P. Schubert	96	Mai 2002
Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie, Recycling Teil III Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. H. Kurkowski Dipl.-Ing. L. Friedl; Prof. Dr.-Ing. P. Schießl Prof. Dr.-Ing. K. Krass, Dr.-Ing. K. Mesters	97	August 2003
Einfluss der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen, Kondensatverwertung bei der KS-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden; Dipl.-Ing. C. Gundlach, Dipl.-Geol. S. Hogewoning, Dr. rer nat O. Schmidt, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	98	Dez. 2003
Optimierung der Verdichtung des Kalksandstein-Gefüges unter Berücksichtigung der Rohstoffeigenschaften und des Herstellprozesses des KS-Scherbens Dipl.-Ing. W. Eden, Dr. rer nat Bernhard Middendorf Univ.- Prof. Dr.-Ing. habil Michael Schmidt, Dipl.-Ing. Viola Tesch	99	Nov. 2004
Reduzierung der CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch Verwendung von Tonmineralen als Optimierungs-Zuschlag Dipl.-Ing. W. Eden, ir. M. H. M. Coppens, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	100	März 2005
Wirklichkeitsnahe Bestimmung der Knicksicherheit von Wänden aus Kalksand-Plansteinmauerwerk in Dünnbettmörtel Dr.-Ing. Christian Glock, Prof. Dr.-Ing. Carl Alexander Graubner	101	Mai 2005
Eignung von Kalksandstein-Material für witterungsbeanspruchte Gebäude-Außenfassaden – „Kalksand-Werksteine“ Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. J.-Ch. Buhl	102	April 2006
Entwicklung von zerstörungsfreien Ersatzprüfverfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit großformatiger Kalksandstein-Produkte Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr.-Ing. W.-R. Metje Dipl.-Ing. E. Dückmann, Dipl.-Ing. H. Naumann	103	Mai 2006
Maßnahmen zur Energieeinsparung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. Andreas van Briel, Dipl.-Ing. Wolfgang Eden Dr. rer nat Holger Müller, Dipl.-Ing. Stefan Wolfram	104	Juni 2007
Entwicklung eines Schnellsrüfverfahrens auf der Basis der Röntgen-Diffraktometrie zur Eignungsbeurteilung von Zuschlägen für die Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. Wolfgang Eden, Prof. Dr. rer nat. Josef-Christian Buhl	105	Juni 2007

Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. rer nat B. Middendorf	106	März 2008
Optimierung des Kalksandstein-Gefüges - Teil 2 Entwicklung von Grundlagen für ein Expertensystem zur Rezepturauslegung von Kalk-Sand-Rohmassen Maximale Packungsdichte Dipl.-Ing. W. Eden, Dipl.-Ing. C. Geisenhanslüke, Dipl.-Ing. A. Glaubitt, Prof. Dr. rer nat B. Middendorf, Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt,	107	März 2008
Entwicklung eines Schnell-Prüfverfahrens zur Bestimmung der Trockenrohichte von Kalksandsteinprodukten unter Anwendung von Mikrowellen-Strahlung Dipl.-Ing. E. Dückmann, Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr.-Ing. W.-R. Metje, Dipl.-Ing. H. Naumann	108	Mai 2008
Nutzbarmachung von huminstoffbelasteten Sanden für die Kalksandsteinindustrie Dipl.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. A. Glaubitt, Univ.-Prof. Dr. rer nat B. Middendorf	109	Sept 2009
Einsatz der Differenzial-Thermo-Analyse als Prüfverfahren für die Qualitätsbewertung bei der Kalksandstein-Produktion Dipl.-Ing. W. Eden, Prof. Dr. rer nat B. Middendorf Dr.-Ing. A. Just	110	Jan. 2010
Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel Dipl.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. G. Kohler, Dipl.-Ing. J. Kollar, Dipl.-Ing. H. Kurkowski Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg, Dr. rer nat F. Schlütter, Dipl.-Ing. N. Sliwa,	111	März 2010
Reduzierung des Energieverbrauchs und der produktionstechnisch bedingten CO ₂ -Emissionen bei der Kalksandstein-Herstellung durch energietechnische Optimierungsmaßnahmen Dr.-Ing. W. Eden, Dr.-Ing. W.-D. Steinmann	112	Sept. 2010

**Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV
des Bundesverbandes Kalksandsteinindustrie eV
Entenfangweg 15
30419 Hannover
Telefon: 05 11 / 279 54-0
Telefax: 05 11 / 279 54-54
E-Mail: wolfgang.eden@kalksandstein.de**

Mitglied der
Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
„Otto von Guericke“ e.V.
- AiF - , Köln