

Energiebilanz und Kosten VOC-

Minderung in der Plattenindustrie

Energy balances and VOC-abatement
costs in the panel board industry



ENERGIETECHNISCHER VERGLEICH VON NASSABSCHIEDERN UND REGENERATIVEN NACHVERBRENNUNGEN ZUR EMISSIONSMINDERUNG NACH TROCKNUNGSANLAGEN IN DER SPAN- UND FASERPLATTENINDUSTRIE

An energy-specific comparison of wet reduction and RTO
systems installed in the particle and fibreboard industry
to reduce emissions after drying



REPORT
REP-0455

Wien 2014

Projektleitung

Jakob Svehla, Umweltbundesamt

AutorInnen

Sascha Polak, Allplan GmbH
Jakob Svehla, Umweltbundesamt

Übersetzung

Brigitte Read, Umweltbundesamt
Jakob Svehla, Umweltbundesamt

Lektorat

Maria Deweis, Umweltbundesamt

Satz/Layout

Elisabeth Riss, Umweltbundesamt

Umschlagphoto

© E. Riss

Die Allplan GmbH hat im Auftrag des Umweltbundesamtes die Energiebilanzen für die Modellanlagen MDF und Spanplatten und die Kosten berechnet. Die Zusammenfassung und Schlussfolgerungen erfolgten durch das Umweltbundesamt.

Weitere Informationen zu Umweltbundesamt-Publikationen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/>

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber: Umweltbundesamt GmbH
Spittelauer Lände 5, 1090 Wien/Österreich

Eigenvervielfältigung

Gedruckt auf CO₂-neutralem 100 % Recyclingpapier

© Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2013

Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-99004-260-1

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG	5
SUMMARY	11
1 EINLEITUNG (MOTIVATION)	17
2 ANALYSE	19
2.1 Modellanlagen	19
2.2 Beschreibung der Modellanlagen-Schemata	22
2.3 Feuerungsanlage	23
2.4 MDF-Modellanlage	23
2.4.1 Nasse Abluftreinigung (Biowäscher).....	24
2.4.2 Trockene Abluftreinigung (RNV)	24
2.5 Spanplatte – Modellanlage	27
2.5.1 Nasse Abluftreinigung	27
2.5.2 Trockene Abluftreinigung (RNV)	27
2.6 Energie- und Kostenvergleich	31
2.6.1 MDF-Anlage	31
2.6.2 Spanplatten-Anlage.....	32
2.7 Kondensieren der Abluftfeuchte	33
2.7.1 MDF-Anlage	33
2.8 Wärmerückgewinnung: Nutzung der erhöhten Ablufttemperatur nach der RNV	35
2.8.1 MDF-Anlage	35
2.8.2 Wärmerückgewinnung Spanplatte	39
2.9 Kostendarstellung – Übersicht	42
2.9.1 MDF Modellanlage	42
2.9.2 Spanplatte Modellanlage.....	47
2.10 Kombination von VOC- und NO_x-Emissionsminderungs- technologien in anderen Branchen	52
2.10.1 Kombination RNV (RTO) mit SNCR	52
2.10.2 Kombination RNV (RTO) mit SCR	53
3 LITERATURVERZEICHNIS	54
4 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	55
5 ANHANG	57

ZUSAMMENFASSUNG

Die hier vorliegende Studie ergänzt den REP-0438 (Spanplatten-Studie, UMWELTBUNDESAMT 2013) um Energiebilanzen für die Spanplatten- und MDF-Herstellung. Auf Basis der Energiebilanzen für zwei standardisierte Modellanlagen wird ein illustrativer Vergleich der unterschiedlichen Abluftreinigungssysteme regenerative Nachverbrennung (RNV) und nassarbeitende Wäscher hinsichtlich ihres jeweiligen Energiebedarfes sowie der VOC- und CO₂-Emissionen durchgeführt. Dabei wird eine Variante der RNV mit Wärmerückgewinnung (WRG) ausgearbeitet. Die Betriebs- und Investitionskosten der Emissionsminderungseinrichtungen werden dargestellt und auf den Produktpreis bezogen. Die spezifischen VOC-Minderungskosten werden ebenso berechnet.

Vergleich von Abluftreinigungskonzepten

Bei der Spanplatten- und MDF-Produktion kommt es u. a. zu Luftschadstoffemissionen von NO_x und VOC. Zur Minderung von VOC-Emissionen sind derzeit vor allem nasse Reinigungsverfahren mit einem VOC-Emissionsminderungsgrad von 10–30 % in Betrieb. Die nassarbeitenden Wäscher sind energetisch weniger aufwändig, jedoch erreichen diese nicht den Emissionsminderungsgrad von thermischen Nachverbrennungsanlagen (> 95–98 %).

Die Installation von thermischen Nachverbrennungsanlagen in die Abluftreinigung des Trockners führt zu erhöhtem Energieaufwand und Kosten, da die Abluft auf 800 °C erhitzt werden muss. Durch eine effiziente Wärmerückgewinnung durch keramische Füllkörper erreichen moderne regenerative thermische Nachverbrennungsanlagen (RNV) einen RNV-Wärmetauscherwirkungsgrad von 95 %. Trotzdem ist eine Gasleistung von 7,4 MW für eine MDF-Anlage (mit einem Abluftvolumenstrom von 472.000 Nm³/h) bzw. von 3,7 MW für eine Spanplatten-Anlage (mit einem Abluftvolumenstrom von 198.000 Nm³/h) notwendig, um den RNV-Betrieb zu gewährleisten.

Da die Temperatur nach der RNV erhöht ist, kann eine weitere Wärmerückgewinnung installiert werden, um die Trocknerzuluft vorzuwärmen. Durch diese Maßnahme lässt sich der thermische Mehrverbrauch auf 2,1 MW für die MDF-Anlage bzw. auf 1,7 MW für die Spanplatten-Anlage senken. Die Wärmerückgewinnung wird über einen Wasserkreislauf bewerkstelligt, wodurch es zu keiner Kondensation und somit zu keinem Abwasser kommt. **Das Potenzial der Wärmerückgewinnung nach der RNV kann allerdings nur bei Anlagen ausgenutzt werden, die nicht bereits über eine Vorwärmung der Trocknerzuluft verfügen. Die allfällige Nutzung als Fernwärme ist nachfrageseitig getrieben.**

Das Kondensieren der Abluft vor der RNV bei der MDF-Anlage ist nicht wirtschaftlich, da die thermische Energieersparnis bei Kondensation gegenüber dem Aufheizen der Feuchte in der RNV gering ist und die Kosten für Strom zur Kühlung die Wärmeersparnis überkompensieren. Durch die Annahme der „nassen Fahrweise“ der RNV für die MDF-Anlage wird ein Abwasserstrom vermieden und etwaige Abwassereinleitungskosten (ca. 100.000 €/a bei einem Abwasserstrom von ca. 30 m³/h mit einer CSB-Beladung von 1.000 mg/l) entfallen.

Energiebedarf und CO₂-Emissionen

Für den Vergleich wurden auch elektrische Verbräuche und Wartungsarbeiten berücksichtigt. Die wichtigsten Kennwerte für die MDF- und Spanplattenanlage sind in Tabelle A dargestellt, wobei 3 Varianten (nasse Reinigung, RNV-Reinigung, RNV-Reinigung mit Wärmerückgewinnung) verglichen werden.

Durch den Einsatz einer regenerativen thermischen Nachverbrennung steigt der thermische Energiebedarf für beide Modellanlagen gegenüber der nassen Abluftreinigung an. Bei der MDF-Anlage beträgt die Steigerung 3,8 % bei einer RNV mit Wärmerückgewinnung, bei der Spanplattenanlage werden 2,8 % mehr Energie benötigt. Die Betriebskosten steigen überproportional zum Energiebedarf, da für die Nachverbrennung im Vergleich zum Holzbrennstoff teureres Erdgas eingesetzt werden muss.

Die fossilen CO₂-Emissionen steigen zwischen 8 % und 17 % bei der Spanplattenanlage und zwischen 14 % und 51 % bei der MDF-Anlage, je nach Installation einer Wärmerückgewinnung nach der RNV.

Tabelle A: Vergleich des thermischen Energiebedarfs, der jährlichen Betriebskosten und fossilen CO₂-Emissionen für die MDF und Spanplattenanlage in Abhängigkeit der Abluftreinigung nach der Trocknung (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

Modellanlage	MDF		Spanplatte	
	MW	MB*	MW	MB*
thermischer Energiebedarf				
nass	54,0		62,2	
RNV inkl. WRG	56,1	3,8 %	63,9	2,8 %
RNV	61,4	13,7 %	65,9	6,0 %
jährliche Betriebskosten (Energie Trocknung + Abluftreinigung)	€	MB*	€	MB*
nass	8.868.920		11.594.800	
RNV inkl. WRG	11.147.243	30,4 %	12.966.932	11,8 %
RNV	12.931.845	51,1 %	13.632.400	17,6 %
fossile CO₂-Emissionen pro Jahr**	t	MB*	t	MB*
nass	22.620		35.836	
RNV inkl. WRG	25.719	13,7 %	38.679	7,9 %
RNV	34.176	51,1 %	41.830	16,7 %

* MB = Mehrbedarf an thermischer Energie/Kosten/CO₂ im Vergleich zur nassen Abluftreinigung

** Annahme: 40 MW Kesselfeuerung ist 100 % biogen, Rest Erdgas; kein CO₂-Preis berücksichtigt

Abluftreinigungskosten

Die Abluftreinigungskosten wurden aus den jährlichen Betriebskosten und den jährlichen Investitionskosten (Verzinsung gerechnet auf 10 Jahre mit 6 % Zinsen) für die jeweiligen RNV in den Modellanlagen gerechnet. Diese betragen bei gleichzeitiger Installation einer Wärmerückgewinnung 2,54 Mio. € (Spanplatte) bzw. 4,28 Mio. € (MDF) gegenüber 1,04 Mio. € und 1,43 Mio. € bei der nassen Reinigung. Die Energieeinsparung durch die Wärmerückgewinnung bei den Trocknungsanlagen wurde der Abluftreinigung zur besseren Darstellung der RNV-Abluftreinigungsanlagen zugerechnet.

Die Wartungskosten für die regenerative Nachverbrennung betragen ca. ein Drittel der Betriebskosten und beinhalten einen kompletten Füllkörperaustausch alle zwei Jahre, um den Wärmerückgewinnungswirkungsgrad innerhalb der Anlagen bei 95 % zu halten. Außerdem wurde in den Wartungskosten berücksichtigt, dass bei einem Eingangstaubgehalt von 10 mg/Nm³ wiederkehrende Reinigungsarbeiten nötig sind.

Kumuliert über 10 Jahre betragen die Abluftreinigungskosten (Betriebskosten zuzüglich den über 10 Jahre mit 6 % verzinsten Investitionskosten) für die MDF-Anlage mit nasser Abluftreinigung 14,35 Mio. €. Diese Kosten betragen bei einer Abluftreinigung mittels RNV 42,77 Mio. € (mit WRG) bzw. 57,84 Mio. € (ohne WRG). Bei der nassen Abluftreinigung entsprechen die Betriebskosten etwa 75 % der Investkosten. Wenn Nachverbrennungstechnologien in der Abluftreinigung von Faser-Trocknungsanlagen eingesetzt werden, steigen die Betriebskosten im Verhältnis und entsprechen bei Installation einer Wärmerückgewinnung ca. dem 2,1-Fachen, ohne Wärmerückgewinnung dem 4,3-Fachen der Investitionskosten.

Die über 10 Jahre kumulierten Abluftreinigungskosten der Spanplattenanlage betragen 10,37 Mio. € bei nasser Reinigung und bei einer RNV mit Wärmerückgewinnung 25,41 Mio. € bzw. 30,92 Mio. € ohne Wärmerückgewinnung. Das Verhältnis von auf 10 Jahre summierten Betriebskosten zu auf 10 Jahre mit 6 % verzinsten Investitionskosten beträgt bei der nassen Abluftreinigung 0,65. Bei der Reinigung mittels RNV mit Wärmerückgewinnung sind die Betriebskosten 2,3-mal höher als die Investitionskosten. Die Betriebskosten betragen ungefähr das 3,8-Fache der Investkosten bei Nachverbrennung ohne Wärmerückgewinnung.

Tabelle B: Vergleich der jährlichen Abluftreinigungskosten, Abluftreinigungskosten über 10 Jahre und Reinigungskosten pro Produktionsmenge für die MDF- und Spanplattenanlage in Abhängigkeit der Abluftreinigung nach der Trocknung (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

Modellanlage	MDF		Spanplatte	
jährliche Abluftreinigungskosten	€		€	
nass	1.434.801		1.036.797	
RNV inkl. WRG*	4.277.242		2.541.104	
RNV	5.784.262		3.092.305	
Abluftreinigungskosten über 10 Jahre	BK Mio. €	IK Mio. €	BK Mio. €	IK Mio. €
nass	6,29	8,06	4,10	6,27
RNV inkl. WRG*	29,07	13,70	17,82	7,59
RNV	46,92	10,92	24,48	6,45
Produktion	320.000	m ³ /a	460.000	m ³ /a
Produktpreis (PP)**	210	€/m ³	150	€/m ³
Reinigungskosten pro Produktionsmenge & Kostenanteil pro Produktpreis	€/m³	% PP	€/m³	% PP
nass	4,5	2,1 %	2,3	1,5 %
RNV inkl. WRG	13,4	6,4 %	5,5	3,7 %
RNV	18,1	8,6 %	6,7	4,5 %

* Verringerte Abluftreinigungskosten sind real Produktionskosteneinsparungen.

** EASTIN I. et al. (2012) UNECE/FAO Forest Products Annual Market Review, 2011–2012

Die Reinigungskosten pro Produktionsmenge erhöhen sich bei der MDF-Anlage und bei Einsatz der RNV auf 13,4 €/m³ (mit WRG) bzw. 18,1 €/m³ (ohne WRG), was 6,4 bzw. 8,6 % des Produktpreises (210 €/m³ MDF-Platte) entspricht. Zum Vergleich betragen die Reinigungskosten bei nasser Abluftreinigung 4,5 €/m³ (2,1 % des Produktpreises).

Bei der Spanplattenanlage betragen die spezifischen Reinigungskosten für die nasse Abluftreinigung 2,3 €/m³. Die Reinigung der Trocknerabluft mittels RNV führt zu einem Anstieg auf 5,5 €/m³ (mit WRG) bzw. 6,7 €/m³ (ohne WRG). Die Kosten entsprechen 3,7 bzw. 4,5 % der Kosten des Produktpreises (150 €/m³ Spanplatte) (siehe Tabelle B).

Berechnung Spanplattenanlage (WESP und RNV)

Die in Tabelle B dargestellten Zahlen für die Spanplattenanlage berücksichtigen nicht die Investitionskosten der für die RNV notwendigen Vorreinigung.

Bei Neubau der gesamten Anlage und unter Berücksichtigung der Investitionskosten, sowohl der Vorreinigung als auch der Hauptreinigung, erhöhen sich die Kosten der Abluftreinigung bei Einsatz einer Wärmerückgewinnung auf 3.167.901 € und ohne Wärmerückgewinnung auf 3.719.102 €. Die spezifischen Kosten der Abluftreinigung betragen somit **6,9 €/m³ (RNV mit WRG) bzw. 8,1 €/m³ (RNV ohne WRG)**, was **4,6 % bzw. 5,4 % des Produktpreises** (bei 150 €/m³ Spanplatte) entspricht.

Abschätzung Spanplattenanlage mit Gewebefilter

Spanplattenanlagen, die in der Lage sind, einen Gewebefilter als Vorreinigung für die regenerative Nachverbrennung einzusetzen (indirekter Trockner), weisen mangels WESP einen geringeren Stromverbrauch auf. Die Abluftreinigungskosten für die regenerative Nachverbrennung sinken auch durch die geringe Wasserdampfmenge, die in die Nachverbrennung eingebracht wird. Die grob abgeschätzten spezifischen Reinigungskosten pro Kubikmeter Platte betragen bei der **Nachverbrennung mit WRG 4,7 €/m³ Platte, ohne WRG 5,9 €/m³ Platte**. Das entspricht einem Anteil am Produktpreis von **3,2 % (mit WRG) bzw. 3,9 % (ohne WRG)**.

Abschätzung für einen zweistufigen MDF-Fasertrockner

Zweistufige MDF-Fasertrockner, die bei gleichem Abluftvolumenstrom wie herkömmliche Trockner mehr Platten produzieren können, weisen dementsprechend geringere Abluftreinigungskosten, bezogen auf die Produktionsmenge, auf. Die abgeschätzten spezifischen Abluftreinigungskosten betragen bei Einsatz von **Nasswäschern 3,2 €/m³, was 1,5 % des Produktpreises** entspricht. Die Kosten erhöhen sich bei Einsatz der Nachverbrennung mit **WRG auf 9,5 €/m³ bzw. 4,5 % des Produktpreises**. **Ohne WRG beträgt die Steigerung 12,9 €/m³ bzw. 6,1 % des Produktpreises**.

Abschätzung für MDF-Fasertrockner mit hohem Frischluftanteil

MDF-Fasertrockner mit hohem Frischluftanteil weisen ein Verhältnis von Produktionsmenge zu Abluftvolumenstrom von ca. 1:2 auf. Dementsprechend sind die Abluftreinigungskosten, bezogen auf die Produktionsmenge höher. Die spezifischen Abluftreinigungskosten betragen bei Einsatz von **Nasswäschern 6,4 €/m³, was 3,0 % des Produktpreises** entspricht. Die Kosten erhöhen sich bei Einsatz der Nachverbrennung mit **WRG auf 19,0 €/m³ bzw. 9,1 % des Produktpreises**. **Ohne WRG beträgt die Steigerung 25,7 €/m³ bzw. 12,2 % des Produktpreises**.

Tabelle C: Vergleich der jährlich abgeschiedenen VOC-Mengen und der Reinigungskosten pro t VOC für die MDF- und Spanplattenanlage in Abhängigkeit der Abluftreinigung nach der Trocknung (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

spezifische VOC-Minderungskosten		
Modellanlage	MDF	Spanplatte
abgeschiedene t VOC	t/a	t/a
nass	105	102
RNV inkl. WRG	343	334
RNV	343	334
Reinigungskosten pro t VOC	€/t	€/t
nass	13.640	10.182
RNV inkl. WRG	12.467	7.593
RNV	16.860	9.240

Durch den wesentlich höheren Abscheidewirkungsgrad der RNV-Anlagen von > 95–98 % gegenüber 10–30 % der nassen Reinigungsanlagen (VDI Richtlinie 3462 Blatt 2) werden größere Mengen VOC durch die Nachverbrennung gemindert. Die Annahme 30% Minderung bei Nassverfahren ist gemäß VDI Richtlinie der günstigste Fall.

Bei der MDF-Anlage betragen die spezifischen VOC-Minderungskosten der RNV ohne WRG 16.860 €/t_{VOC}, mit Wärmerückgewinnung 12.467 €/t_{VOC}. Im Vergleich weist die nassen Reinigung Kosten von 13.640 €/t_{VOC} auf.

Die spezifischen VOC-Reinigungskosten bei der Spanplatten-Anlage sinken von 10.182 €/t_{VOC} bei der nassen Abluftreinigung auf 7.593 €/t_{VOC} bei Einsatz einer RNV mit Wärmerückgewinnung bzw. betragen bei Einsatz einer RNV ohne Wärmerückgewinnung 9.240 €/t_{VOC}.

Gegenüberstellung VOC-Minderung und Erhöhung der NO_x- und CO₂-Emissionen

Bei der **MDF-Modellanlage** steht einer Reduktion von 240 t VOC eine Erhöhung von ca. 3.000–12.000 t fossilem CO₂ durch den Gaseinsatz in der RNV und eine grob abgeschätzte Erhöhung an NO_x von ca. 113 t/a¹ gegenüber.

¹ Emissionsfracht beruht auf Angabe einer Emissionserhöhung von 30 mg/Nm³ aus einer Spanplattenanlage mit der Abluftreinigungskombination Elektroiesbetfilter/RNV.

Bei der **Spanplatten-Modellanlage** steht die Minderung von ca. 230 t VOC einer Erhöhung von ca. 3.000–6.000 t fossilem CO₂ durch den Gaseinsatz in der RNV und eine grob abgeschätzte Erhöhung an NO_x von ca. 48 t/a¹ gegenüber.

Kombinierte VOC–NO_x-Minderung in der Zementindustrie

In andere Branchen (Zementindustrie) wurden Konzepte entwickelt, die eine VOC-Minderung mittels Nachverbrennung bei gleichzeitiger NO_x-Reduktion erlauben. Die Kombinationen von RNV und SNCR bzw. SCR in der Zementindustrie sind in der Studie erläutert.

SUMMARY

The study presented here complements the report REP-0438 (particle board study, UMWELTBUNDESAMT 2013) by adding energy balances for particle board and MDF production. On the basis of the energy balances for two standardised facilities (model facilities), two exhaust air cleaning systems (regenerative thermal oxidisers (RTO) and wet air purification devices) are compared illustratively with regard to their respective energy demand and the VOC and CO₂ emissions. An alternative RTO with heat recovery is also presented. Operating and investment costs for emission reduction measures are shown in relation to the product price. Specific VOC reduction costs have also been calculated.

Comparison of exhaust air cleaning concepts

Particle board and MDF facilities produce, amongst others, NO_x and VOC emissions. The techniques currently used to reduce VOC emissions are wet air purification processes with a VOC reduction efficiency of 10–30%. The wet processes, though less energy consuming, do not achieve the same emission reduction efficiency as thermal oxidisers (> 95–98%).

Installing thermal oxidation in the exhaust air cleaning systems of dryers increases the energy demand and the costs, since the exhaust air has to be heated up to 800 °C. Through efficient heat recovery with ceramic packing material, modern regenerative thermal oxidisers (RTOs) achieve an RTO-heat exchange efficiency of 95%. Nevertheless, to ensure RTO operation in a MDF plant with an exhaust air volume flow of 472,000 Nm³/h, an input of 7.4 MW of gas power is necessary. In a particle board plant where the exhaust air volume flow is 198,000 Nm³/h 3,7 MW of gas power is necessary.

As the temperature after regenerative thermal oxidation is higher, another heat recovery process can be introduced to preheat the air supplied to the dryer. In this way the extra thermal energy consumption can be reduced to 2.1 MW for the MDF plant and 1.7 MW for the particle board plant, respectively. Heat recovery is achieved by a water cycle so that there is no condensation and thus no wastewater. **The potential of the heat recovery process after the RTO can be utilized only for plants, where the air supplied to the dryer is not preheated. The possible utilisation as community heating is driven by demand.**

In the MDF plant, condensation of exhaust air prior to RTO is not economical advantageous since the amount of thermal energy saved in condensation is small against the heating up of humidity in an RTO and the electricity costs for cooling over-compensate the thermal energy savings. If one assumes a "wet mode of operation" for the RTO in an MDF facility a wastewater flow – and any wastewater discharge costs (about 100,000€/a for a wastewater flow of about 30 m³/h with a COD load of 1,000 mg/l) – can be avoided.

Energy demand and CO₂-emissions

Electricity consumption and maintenance work were also considered in the comparison. The most important parameters for the MDF and particle board facility are shown in table A where three processes (wet process, RTO and RTO with heat recovery) are compared.

When using an RTO process, the thermal energy consumption increases in both model facilities in comparison to the wet exhaust air cleaning process. In the MDF plant the increase in energy demand is 3.8% for RTO with heat recovery, while it is 2.8% in the particle board plant. The increase in the operating costs is comparatively higher than the increase in energy demand, since natural gas (which is more expensive than fuel wood) has to be used for thermal oxidation.

The increase in fossil CO₂ emissions is between 8% and 17% in the particle board plant and between 14% and 51% in the MDF plant, depending on whether a heat recovery process is installed after the RTO.

Table A: A comparison of the thermal energy demand, the annual operating costs and the fossil CO₂ emissions for the MDF and the particle board facility, depending on which exhaust air cleaning process has been installed after drying (Source: Allplan, Umweltbundesamt).

Model facility	MDF		Particle board	
	MW	extra demand*	MW	extra demand*
thermal energy demand				
wet process	54.0		62.2	
RTO incl. heat recovery	56.1	3.8 %	63.9	2.8 %
RTO	61.4	13.7 %	65.9	6.0 %
annual operating costs (energy drying + exhaust air cleaning)	€	extra demand*	€	extra demand*
wet process	8,868,920		11,594,800	
RTO incl. heat recovery	11,147,243	30.4 %	12,966,932	11.8 %
RTO	12,931,845	51.1 %	13,632,400	17.6 %
fossil CO₂ emissions per year**	t	extra demand*	t	extra demand*
wet process	22,620		35,836	
RTO incl. heat recovery	25,719	13,7 %	38,679	7.9 %
RTO	34,176	51,1 %	41,830	16.7 %

* Extra demand for thermal energy/costs/CO₂: in comparison to the wet exhaust air cleaning process

** Assumption: 40 MW boiler fired with 100 % biogenous fuel; remainder: natural gas; CO₂ price not considered

Costs for exhaust air cleaning

The costs for exhaust air cleaning were calculated on the basis of the annual operating costs and the annual investment costs (calculated at an interest rate of 6% over ten years) for the respective RTO process in the model plants. When also installing a heat recovery system, the costs for cleaning amount to 2.54 m€ (particle board) and 4.28 m€ (MDF), compared to 1.04 and 1.43 m€ for the wet cleaning process. The energy savings achieved through heat recovery in the dryers were included with exhaust air cleaning to give a better representation of the RTO exhaust air cleaning systems.

In the maintenance costs for the regenerative thermal oxidation, a frequent change of the ceramic packing material was taken into account. Thus, the heat exchange efficiency of 95% can be preserved. Additionally, it was considered that frequent cleaning is required with an inlet dust content of 10 mg/Nm³.

Over 10 years, the cumulative exhaust air cleaning costs (operating costs plus investment costs calculated at an interest rate of 6% over 10 years) for the MDF plant with wet exhaust air purification are 14.35 m€. For exhaust air cleaning with RTO these costs amount to 42.77 m€ (with heat recovery) and to 57.84 m€ (without heat recovery). For the wet process, the operating costs amount to about 75% of the investment costs. If thermal oxidation technologies are used for exhaust air cleaning in fibre drying facilities, there is a relative increase in the operating costs so that they are 2.1 times the amount of the investment costs where a heat recovery system has been installed, and 4.3 times the amount of the investment costs where there is no heat recovery.

For the particle board plant, the cumulative exhaust air cleaning costs over 10 years are 10.37 m€ (wet cleaning process), 25.41 m€ (RTO with heat recovery) and 30.92 m€ (RTO without heat recovery). The ratio between the cumulative operating costs over 10 years and the investment costs calculated at a 6% interest rate over 10 years is 0.65 for the wet process. For cleaning with RTO including heat recovery the operating costs are 2.3 times higher than the investment costs. The operating costs for thermal oxidation without heat recovery are almost 3.8 times the amount of the investment costs.

Table B: A comparison of the annual costs for exhaust air cleaning, calculated over 10 years, and the cleaning costs per production volume in an MDF and particle board producing facility, depending on which exhaust air cleaning process has been installed after drying (Source: Allplan, Umweltbundesamt).

Model facility	MDF		Particle board	
annual costs for exhaust air cleaning	€		€	
wet process	1,434,801		1,036,797	
RTO incl. heat recovery*	4,277,242		2,541,104	
RTO	5,784,262		3,092,305	
Costs for exhaust air cleaning, calculated over 10 years	OC m€	IC m€	OC m€	IC m€
wet process	6.29	8.06	4.10	6.27
RTO incl. heat recovery*	29.07	13.70	17.82	7.59
RTO	46.92	10.92	24.48	6.45
production	320,000	m ³ /a	460,000	m ³ /a
product price (PP)**	210	€/m ³	150	€/m ³
Cleaning costs per production volume & in relation to the product price	€/m³	%PP	€/m³	%PP
wet process	4.5	2.1 %	2.3	1.5 %
RTO incl. heat recovery	13.4	6.4 %	5.5	3.7 %
RTO	18.1	8.6 %	6.7	4.5 %

* Reduced exhaust air cleaning costs are real cost savings in manufacturing

** Ivan Eastin et al.; UNECE/FAO Forest Products Annual Market Review, 2011–2012

In the MDF plant where RTO is used, the cleaning costs per production volume increase to 13.4 €/m³ (with heat recovery) and to 18.1 €/m³ (without heat recovery), which corresponds to 6.4% and 8.6%, respectively of the product price (210 €/m³ of MDF board), whereas the cleaning costs for the wet cleaning process are 4.5 €/m³ (2.1% of the product price).

In the particle board plant, the specific cleaning costs for the wet process are 2.3 €/m³. Cleaning the exhaust air from the dryers via RTO leads to higher costs of 5.5 €/m³ (with heat recovery) and 6.7 €/m³ (without heat recovery). These costs correspond to 3.7% and 4.5%, respectively of the product price (150 €/m³ of particle board) (see table B).

Calculation particle board facility-new plant (WESP and RTO)

The data, shown in table B, do not include the investment costs for the pre-cleaning, which is necessary for the operation of a RTO.

Due to a new construction of the entire facility and under consideration of the investment costs of pre-cleaning and main-cleaning, the costs for exhaust air cleaning with heat recovery increase to 3,167,901 € and 3,719,102 without heat recovery. The specific costs for the exhaust air cleaning are **6.9 €/m³ (RTO with heat recovery) and 8.1 €/m³ (RTO without heat recovery)**. These data correspond to **4.6% and 5.4%**, respectively of the product price (150 €/m³ of particle board).

Estimation particle board facility with fabric filters

Particle board facilities, which are able to use fabric filters for pre-cleaning for the RTO (indirect heated dryers) do have smaller electricity consumption due to the lack of a WESP. The costs for exhaust air cleaning by an RTO are furthermore lower due to a smaller amount of humidity, which is ducted to the thermal oxidation. The roughly estimated specific costs for exhaust air cleaning per cubic meter particle board are for a **RTO with heat recovery 4.7 €/m³ and without heat recovery 5.9 €/m³**. These data correspond to **3.2% and 3.9%**, respectively of the product price.

Estimation for a two-stage MDF fibre dryer

Two-stage MDF fibre dryers can produce more boards with the same exhaust air stream compared to conventional dryers. Thus, costs for exhaust air cleaning which refer to the amount of produced boards are lower. The estimated specific costs for exhaust air cleaning by a **wet cleaning process are 3.2 €/m³**, which corresponds to **1.5% of the product price**. The costs increase to **9.5 €/m³ and 4.5% of the product price** when **heat recovery** is used. **Without heat recovery** the costs increase to **12.9 €/m³ and 6.1% of the product price**.

Estimation for MDF fibre dryer with high amount of fresh air

MDF fibre dryers with a high amount of fresh air do have a ratio of produces boards to exhaust air stream of 1:2. Thus, costs for exhaust air cleaning which refer to the amount of produced boards are higher. The specific costs for exhaust air cleaning by a **wet cleaning process are 6.4 €/m³**, which corresponds to **3.0% of the product price**. The costs increase to **19.0 €/m³ and 9.1% of the product price** when **heat recovery** is used. **Without heat recovery** the costs increase to **25.7 €/m³ and 12.2% of the product price**.

Specific VOC-abatement costs

Table C: A comparison of the amounts of VOCs removed annually and the cleaning costs per tonne of VOC in the MDF and the particle board producing facility, depending on which exhaust air cleaning process has been installed after drying (Source: Allplan, Umweltbundesamt).

Model facility	MDF	Particle board
abated VOCs (in t)	t/a	t/a
wet process	105	102
RTO incl. heat recovery	343	334
RTO	343	334
Cleaning costs per t of VOC	€/t	€/t
wet process	13,640	10,182
RTO incl. heat recovery	12,467	7,593
RTO	16,860	9,240

Due to the considerably higher emission reduction efficiency of RTO systems (> 95–98% compared to 10–30% with the wet process, see VDI Guideline 3462 Sheet 2), VOC emissions are reduced substantially through thermal oxidation. Assuming a 30% reduction for the wet process is, according to the VDI Guideline, the best-case scenario.

In the MDF plant, the specific VOC reduction costs for RTO without heat recovery are 16,860 €/t_{VOC} and with heat recovery 12,467 €/t_{VOC}. In comparison, the costs for the wet process are 13,640 €/t_{VOC}.

The specific VOC reduction costs in the particle board plant decrease from 10,182 €/t_{VOC} for the wet process to 7,593 €/t_{VOC} if RTO with heat recovery is used, and to 9,240 €/t_{VOC} for RTO without heat recovery.

Comparison VOC-abatement and increase in NO_x and CO₂ emissions

The reduction of 240 t VOC in the MDF model plant is accompanied by an increase of 3,000 to 12,000 t in fossil CO₂ due to the usage of natural gas in the RTO and a roughly estimated increase in NO_x of approximately 113 t/a⁵.

The reduction of 230 t VOC in the particle board model plant is accompanied by an increase of 3,000 to 6,000 t in fossil CO₂ due to the usage of natural gas in the RTO and a roughly estimated increase in NO_x of approximately 48 t/a⁵.

Combined VOC-NO_x abatement in the cement industry

In other sectors (e.g. the cement industry) strategies have been developed which make it possible to achieve VOC reductions through thermal oxidation while reducing NO_x-emissions at the same time. Combinations of RTO and SNCR or SCR are explained in this study.

⁵ The emission load is based on an increase of 30 mg/Nm³ in a particle board plant with an exhaust air cleaning combination electrified gravel bed filter/RTO

1 EINLEITUNG (MOTIVATION)

Die Span- und Faserplattenindustrie stellt einen wichtigen Industriezweig in Österreich dar. Insgesamt werden jährlich ca. 2,2 Mio. m³ Spanplatten und 700.000 m³ MDF-Platten produziert. Die Branche beschäftigt ca. 3.500 MitarbeiterInnen.

Span- und Faserplatten werden durch Pressen von Spänen oder Fasern mit Bindemitteln und Zusatzstoffen hergestellt. Die Späne und Fasern müssen vor der Verarbeitung zu Holzwerkstoffen in Trocknern auf eine bestimmte Holzfeuchte gebracht werden. Dabei verdampfen nicht nur das im Holz befindliche Wasser sondern auch die organischen Inhaltsstoffe, wodurch es bei der Holz Trocknung zu VOC-Emissionen kommt. Neben den natürlich im Holz vorkommenden organischen Verbindungen (u. a. Pinene) entstehen durch die Temperatureinwirkung Zersetzungsprodukte wie beispielsweise Formaldehyd, Methanol und organische Säuren und werden ebenfalls emittiert.

Die Minderung der VOC-Emissionen aus den Trocknern der Span- und Faserplattenwerke in Österreich und Europa erfolgt überwiegend durch den Einsatz von nassarbeitenden Wäschern (Nasselektrofilter (WESP) und/oder Biofilter). Gemäß VDI Richtlinie 3462 Blatt 2 erreichen die Wäscher nur einen Abscheidegrad von ca. 10–30 % für VOC. Thermische Verfahren hinter Trocknern sind eine regenerative Nachverbrennung (RNV; u. a. in den USA und bei einer Anlage in Österreich eingesetzt) und das UTWS-Verfahren (3–4 Anlagen in Europa).

Ein Abscheidegrad an VOC von > 95–98 % wird bei Einsatz von regenerativen Nachverbrennungen (RNV) erreicht, wobei die organischen Verbindungen dabei durch Aufheizen der Abluft verbrannt werden.

Tabelle 1: Jahresfrachten (auf Basis der mittleren Volumenströme) und spezifische Frachten an VOC nach den Trocknern der österreichischen MDF- und Spanplattenwerke (Quelle: Umweltbundesamt).

Frachten VOC	VOC Konzentration [mg/Nm ³]		Abluftvolumenstrom [Nm ³ /h]	Jahresfracht [t/a]		spezifische Frachten [kg/m ³ Produkt]	
	von	bis		average (Volumenstrom)	average (Volumenstrom)	von	bis
			average	average (Volumenstrom)	average (Volumenstrom)		
Egger URB , Spanplatten Gewebefilter	190	219	212.000	322	371	0,51	0,58
Egger WRG* , Spanplatten Zyklon	98	132	ca. 50.000	45	50	0,30	0,33
Egger SJO , Spanplatten Wäscher & WESP	106	139	130.000	110	145	0,24	0,32
Funder ND , Spanplatten Nasswäscher & WESP	92	135	130.000	96	141	0,19	0,28
Kaindl Spanplattenlinie, Spanplatten EKBF & RNV	1,4	1,9	190.000	2	3	0,01	0,01
Kaindl MDF-Linie, MDF-Platten Venturi- & Biowäscher	29	37	800.000 **	184	237	0,46	0,59
MDF-Hallein , MDF-Platten WESP & Biowäscher	63		320.000	141		0,47	

* Die Abluftvolumenströme der Trockner des Werkes in Wörgl wurden geschätzt.

***Maximaler zeitweise erreichter Abluftvolumenstrom*

Das Umweltbundesamt hat anhand der VOC-Emissionsmesswerte nach den Span- bzw. Faser Trocknern der österreichischen Werke und den zugehörigen Abluftvolumenströmen (REP-0438 (UMWELTBUNDESAMT 2013) und BAT-Fragebögen) die VOC-Frachten berechnet.

Bei Einsatz von regenerativer thermischer Nachverbrennung (RNV) liegen die VOC-Frachten bei 2 bis 3 t pro Jahr. Die Jahresfrachten bei nassabscheidenden Technologien betragen bei der Spanplattenproduktion je nach Größe der Anlage und des Produktionsvolumens zwischen ca. 50 t und 150 t pro Jahr, bei MDF-Platten zwischen 140 t und 240 t pro Jahr.

Die spezifische Fracht bei Minderung der VOC-Emissionen durch RNV liegt bei ca. 0,01 kg/m³ Spanplatten. Die spezifischen Frachten an VOC bei der Verwendung von Wäschern zur Abluftreinigung bei der Spanplattenherstellung betragen 0,19–0,33 kg/m³ Produkt, bei der MDF-Plattenherstellung 0,46–0,59 kg/m³ Produkt.

Bei einer Anlage werden Gewebefilter zur Reinigung der Trocknerabluft eingesetzt. Die VOC-Jahresfracht beträgt 320–370 t pro Jahr, bei einer spezifischen VOC-Fracht von 0,51–0,58 kg/m³ Produkt.

Die Konzentrationen, die VOC-Frachten und die spezifischen VOC-Frachten sind bei Einsatz der RNV zur VOC-Minderung in der Trocknerabluft im Vergleich zu nassarbeitenden Wäschern deutlich geringer. Die Erwärmung der Trocknerabluft zur Emissionsminderung in der RNV erfolgt durch Einsatz von Erdgas, wodurch ein höherer Energiebedarf und eine Erhöhung der Stickstoffoxid-Emissionen von ca. 30 mg/Nm³ im Vergleich zu den Wäschersystemen entstehen. Das entspricht bei Abluftvolumenströmen von 472.000 m³/h (MDF-Anlage) bzw. 198.000 m³/h (Spanplattenanlage) ca. 113 t NO_x/a bzw. ca. 48 t NO_x/a.

Die vorliegende Studie beleuchtet den Energiebedarf der Span- und Faserplattenproduktion (Trocknung der Fasern und Späne sowie der Abluftreinigung) sowie darauf aufbauend die Investitions- und Betriebskosten der nassen Abgasreinigung und der RNV. Kombinierte Verfahren zur VOC- und NO_x-Minderung in anderen Branchen werden ebenfalls dargestellt.

2 ANALYSE

2.1 Modellanlagen

Für jede der beiden Produktionen werden zwei Modellanlagen (MA) konzipiert, welche sich durch unterschiedliche Abluftreinigungsverfahren unterscheiden.

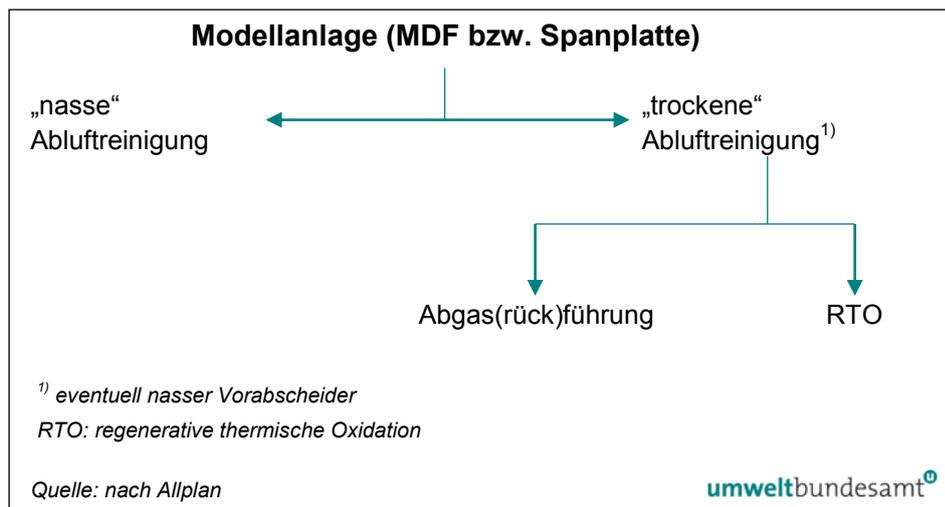


Abbildung 1:
Modellanlagen.

Diese vier Varianten sind in Tabelle 4 genauer beschrieben. Beide Modelle bauen auf einer 40 MW Feuerungsanlage auf, welche vorwiegend mit Holz aus der eigenen Produktion befeuert wird. Es werden 8.000 Betriebsstunden angenommen.

Die Trocknung findet direkt im Trommel- (Spanplatte) oder Stromtrockner (MDF) statt, wobei die Temperaturen in den Trocknern 300 °C bzw. 150 °C betragen. Die in den Trockner eingetragenen Fasern haben eine Feuchte von 100 %, welche durch das Trocknen auf 5–10 % (MDF) bzw. 2 % (Spanplatte) reduziert wird. Die wesentlichen Daten der Trocknerabluft sind ~ 55 °C und 600.000 m³/h (MDF) bzw. 120 °C und 300.000 m³/h (Spanplatte).

Nach der Trocknung wird das Produkt über Zyklone ausgetragen und die Abluft gereinigt. Zuerst werden mittels Nass-Elektrofilter Partikel abgeschieden. Die weitere Reinigung erfolgt:

1. **Nass** – mittels Wäscher
 - a. Spanplatte: Waschflüssigkeiten werden im Gegenstrom betrieben, um Schadstoffe aus der Abluft auszuschwemmen.
 - b. MDF: Unter Eindüsung von Wasser werden an Füllkörpern, an denen Mikroorganismen angesiedelt sind, Schadstoffe abgeschieden.
2. **Trocken** – mittels thermischer regenerativer Nachverbrennung (RNV)

Um einen effektiven Abbau der Schadstoffkonzentration zu garantieren, müssen Temperaturen von mindestens 800 °C erreicht werden. Die effizienteste thermische Nachverbrennung ist die regenerative Nachverbrennung (RNV-Anlage), welche einen Wärmetauscher-Wirkungsgrad von 90–98 % aufweist (siehe Tabelle 2). Hier werden 3 keramische Wärmetauschersegmente alternierend als Wärmespeichermassen verwendet, um die Energieausbeute aus der Abluft zu maximieren.

Bei einer rekuperativen Nachverbrennung wird ein Rohrbündel-Wärmetauscher verwendet, welcher wegen der fehlenden Wärmespeicherung eine geringere Effizienz aufweist.

Tabelle 2:
Kennzahlen verschiedener Nachverbrennungstechnologien*
(Quelle: Allplan).

	RNV	rekuperative Nachverbrennung	Auswirkung
Art des Wärmetauschers	Füllkörperschüttung	Rohrbündelwärmetauscher	höherer Wirkungsgrad der Wärmetauscher bei RNV
Vorerwärmung, Wärmetauscher-Wirkungsgrad	780 °C ca. 90–98 %	500–600 °C ca. 70–80 %	geringerer Bedarf an Zusatzbrennstoff bei RNV
Reingasaustrittstemperatur	ca. 40–200 °C	ca. 250–400 °C	Verwendung von Prozesswärme bei rekuperativer NV geboten

* Prozess-nachgeschaltete Maßnahmen zur Minderung von flüchtigen organischen Verbindungen; DFU (2002), Umsetzung der IVU-Richtlinie; digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/3243

Die Effizienz der Wärmerückgewinnung ist entscheidend, da bereits geringe Effizienzsteigerungen große Auswirkungen zur Folge haben. Zum Beispiel bedeutet eine Effizienzsteigerung von 20 % (siehe Tabelle 3) bei der Spanplatten-Modellanlage eine Kostenreduktion von 4,1 Mio. € pro Jahr, weshalb die RNV-Variante prinzipiell vorzuziehen ist.

Tabelle 3:
Kostenvergleich
Technologien
thermische
Nachverbrennung
(Quelle: Allplan).

Spanplatte Modellanlage			
Volumenstrom trocken	186.600	Nm ³ /h	
Massenstrom gesamt	262.517	kg/h	
Temperatur Abluftstrom	98	°C	
Feuchte relativ	15	%	
Feuchte absolut	104	g/kg	
Enthalpie feucht	367	kJ/kg	
Zieltemperatur RNV	800	°C	
benötigte Leistung	51,2	MW	
Technologie Vergleich	rekuperativ (75 %)	regenerativ (95 %)	
RNV-Wirkungsgrad	75,0	95,0	%
Gasleistung	12,8	2,5	MW
Brennstoffeinsatz Differenz	10,3		MW
Jahresbrennstoffeinsatz (8.000 h)	82.080,0		MWh
Kostendifferenz (50 €/MWh)	4,1		Mio. €

Aufgrund von realen Anlagendaten wurde ein RNV-Wirkungsgrad von 95 % als realistisch angenommen. In den Wartungskosten für die regenerative Nachverbrennung wurde ein regelmäßiger Füllkörpertauch mit einbezogen, um den Wärmerückgewinnungswirkungsgrad innerhalb der Anlagen bei 95 % zu halten. Außerdem wurde in den Wartungskosten berücksichtigt, dass bei einem Eingangsstaubgehalt von 10 mg/Nm³ wiederkehrende Reinigungsarbeiten nötig sind.

Tabelle 4: Modellanlagenbeschreibung (Quelle: Allplan).

pro Linie je eine Presse	MDF-Linie	Spanplatten-Linie		
Energiebereitstellung und Emissionsminderung	Feuerungsanlage (Vorschubrost) vorwiegend mit Holz befeuert (eventuell Altholz, interne Produktionsabfälle) gegebenenfalls Erdgas Zusatzfeuerung. Brennstoffwärmeleistung 40 MW (Feuerung für den gesamten Standort) SNCR nach Feuerung Energieverbrauch bei ausschließlich thermischer Nutzung (8.000 Betriebs-h/a und 90 % der BWL) 288 GWh = ca. 1.000 TJ	Feuerungsanlage (Vorschubrost) vorwiegend mit Holz befeuert (eventuell Altholz, interne Produktionsabfälle) gegebenenfalls Erdgas Zusatzfeuerung. Brennstoffwärmeleistung 40 MW (Feuerung für den gesamten Standort) SNCR nach Feuerung Energieverbrauch bei ausschließlich thermischer Nutzung (8.000 Betriebs-h/a und 90 % der BWL) 288 GWh = ca. 1.000 TJ		
direkt/indirekt	direkt	direkt		
Produkt/Beleimung der Fasern & Späne	Fasertrockner MDF (Stromtrockner) blow line Beleimung bei der Trocknung fiktive Faserfeuchte 100 % (Endfeuchte Fasern 5–10 %)	Spänetrockner (gegebenenfalls 2–3 Trockner) Beleimung nach der Trocknung fiktive Holzfeuchte 100 % (Endfeuchte Späne ca. 2 %)		
Abluftvolumenstrom und Parameter der Abluft	600.000 m ³ /h; 472.000 Nm ³ /h relative Feuchte: 100 % Austrittstemperatur 50–55 °C (nach Trockner)	300.000 m ³ /h; 198.000 Nm ³ /h relative Feuchte: 20–30 % Austrittstemperatur 120 °C (nach Trockner)		
Plattenproduktion	320.000 m ³ /a (bei 8.000h und 0,7 m ³ /t)	460.000 m ³ /a (bei 8.000h und 0,7 m ³ /t)		
Emissionsminderungs-Technologien	Nachverbrennung	Wäscher	Nachverbrennung	Wäscher
	Zyklon zur Produktabtrennung	Zyklon zur Produktabtrennung	Zyklon zur Produktabtrennung	Zyklon zur Produktabtrennung
	<ul style="list-style-type: none"> ● Vorfilter: WESP ● RTO: Feuerungsleistung 5 MW bei 8.000 Betriebs-h/a = 144 TJ/a ● Energiebedarf (Grob-schätzung) 40 GWh/a thermisch 5 GWh/a elektrisch ● Auskondensierung der Feuchtigkeit ● Abwasser: Einleitung in kommunale Kläranlage? Klärung on site? energetische Nutzung? 	<ul style="list-style-type: none"> ● Wäscher oder WESP ● Biowäscher ● Energiedaten: WESP: 200 kW + Biowäscher: 320 kW 	<ul style="list-style-type: none"> ● Vorfilter: WESP ● RTO: Feuerungsleistung Beispiel 4 MW (aufgeteilt auf 2 Brenner in 2 RTOs zu je 1 MW) bei 8.000 Betriebs-h/a = 115 TJ/a ● Energiebedarf 165 MJ/m³ Spanplatte (= 4,6 m³ Erdgas) bei 500.000 m³/a = 82,5 TJ/a elektrischer Energiebedarf für Abluftreinigung 591 kW (Energiedaten 1996; Produktionsvolumen 2012) ● Energiedaten Beispiel-anlage für 100.000 m³/h 70 m³/h Erdgas (ohne Vorwärmung der Verbrennungsluft) Daten von Abnahmemessung 1994 bei 300.000 m³/h und 8.000 Betriebs-h/a = 60,5 TJ/a 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sprühquenche ● Wäscher ● WESP ● Energiedaten : ca. 500 kW
	Abwärmenutzung	Abwärmenutzung	Abwärmenutzung	Abwärmenutzung
Emissionswerte nach Minderung	<ul style="list-style-type: none"> ● org. C Konzentration nach Wäschern bis zu 65 mg/Nm³ (Wäscherabscheidegrad 10–30 %) ist O₂-Gehalt ● NO_x: ca. 70–160 mg/Nm³ (13 % O₂-Gehalt) (gemessen nach Feuerung) 	<ul style="list-style-type: none"> ● org. C Konzentration nach Wäschern bis zu 150 mg/Nm³ (Wäscherabscheidegrad 10–30 %) 17 % O₂-Gehalt ● NO_x: ca. 200 mg/Nm³ (gemessen nach Feuerung und Emissionsminderung Trockner) 	<ul style="list-style-type: none"> ● org. C Konzentration nach RTO bis zu 2–3 mg/Nm³ (17 % O₂-Gehalt) ● NO_x ca. 180–290 mg/Nm³ (17 % O₂-Gehalt) ca. 30 mg/Nm³ durch RTO verursacht 	<ul style="list-style-type: none"> ● org. C Konzentration nach RTO bis zu 2–3 mg/Nm³ (17 % O₂-Gehalt) ● NO_x ca. 180–290 mg/Nm³ (17 % O₂-Gehalt) ca. 30 mg/Nm³ durch RTO verursacht

Tabelle 5:
VOC-Abscheidung –
Vergleich
(Quelle: Allplan).

Modellanlage	MDF	Spanplatte	
VOC-Beladung vor Wäscher	92,9	214,3	mg/Nm ³
Abscheidegrad			
nass	30	30	%
RNV	98	99	%
VOC-Beladung nach Wäscher			
nass	65	150	mg/Nm ³
RNV	2	3	mg/Nm ³
Abluftvolumenstrom			
pro Stunde	472.000	198.000	Nm ³ /h
pro Jahr	3.776.000.000	1.576.000.000	Nm ³ /a
VOC-Reinigung			
nass	27,9	64,3	mg/Nm ³
RNV	90,9	211,3	mg/Nm ³
nass	105,2	101,8	t/a
RNV	343,1	334,7	t/a

In Tabelle 5 sind die Abscheidewirkungsgrade der nassen und trockenen Abluftreinigung dargestellt. Ausgehend von einer VOC-Beladung von 65 bzw. 150 mg/Nm³ nach der nassen Abluftreinigung und 2–3 mg/Nm³ nach der trockenen Abluftreinigung wurde über dem bekannten Abscheidewirkungsgrad die VOC-Beladung der Abluft vor der Reinigungsanlage errechnet.

Die **VOC-Gesamtabscheidung** pro Jahr liegt bei der RNV-Reinigung **230–240 t/a** über der nassen Abscheidung.

2.2 Beschreibung der Modellanlagen-Schemata

Für jede Modellanlage wurden Schemata erstellt, welche die relevanten Energie- und Stoffströme in den Anlagen beschreiben. Ausgehend vom 40 MW Kessel wird die erzeugte Energie einerseits über einen Thermoöl-Kreislauf zu den jeweiligen Verbrauchern gebracht. Des Weiteren wird das Rauchgas bei erhöhter Temperatur (300 °C bzw. 150 °C) aus dem Kessel geleitet, gereinigt und in den Trockner geführt.

Neben dem Rauchgas werden feuchte Holzfasern bzw. Späne pneumatisch in den Trockner geleitet. Durch die Hitze wird dem Material die Feuchte entzogen. Das Trocknerabgas hat daher eine hohe Feuchte- und Schadstoffbeladung.

Im Unterschied zur MDF-Anlage läuft die Spanplatten-Trocknung bei höheren Temperaturen und niedrigeren Volumenströmen ab. Bei beiden Anlagen muss zugefeuert werden, um die benötigten Temperaturen gewährleisten zu können. Über einen Zyklon wird das getrocknete Material abgeführt und der Abluftreinigung zugeführt, welche nass oder trocken erfolgen kann (siehe Folgekapitel).

2.3 Feuerungsanlage

Die Feuerungsanlagen sind für alle Modellanlagen gleich. Für die Feuerung wurden die folgenden Eckdaten angenommen.

Leistung	40	MW
Hu Holz trocken	5	kWh/kg
Holzfeuchte	30	%
O ₂ im Rauchgas	11	%
Luftüberschuss	2.1	
Aschegehalt	5	%

*Tabelle 6:
Feuerung
(Quelle: Allplan).*

Nach Verbrennungsrechnung ergibt sich dadurch ein Zuluftbedarf von knapp 90.000 Nm³/h trocken. Des Weiteren wurde eine Abgastemperatur von 300 °C angenommen. Die Rauchgasdaten sind:

Leistung feucht	13,8	MW
Volumenstrom f	90.500	Nm ³ /h
Temperatur	300	°C
Absolute Feuchte	35	g/kg tr

*Tabelle 7:
Rauchgas
(Quelle: Allplan).*

Die angenommenen einzuhaltenden Grenzwerte nach der Feuerung sind:

- NO_x: 200 mg/Nm³
- CO: 100 mg/Nm³
- VOC: 10 mg/Nm³
- NH₃: 10 mg/Nm³

2.4 MDF-Modellanlage

Die Jahresproduktion der MDF-Modellanlage liegt bei 320.000 m³/a, womit man den Abluft-Volumenstrom mit 470.000 Nm³/h definieren kann. Die Produktion ist somit 40 m³/h bzw. 27,9 t/h trocken (Restfaserfeuchte 7%). Somit ergibt sich bei einer Faserfeuchte von 100 % eine Einsatzmenge von 49 t/h.

Die Zuluft, über der die Holzfasern (Holzfaserfeuchte 100 %, Holzfasereintrag 49 t/h feucht) eingetragen werden als auch der Holzfaser-Massenstrom sind so angepasst, dass die Modellanlagenvorgaben bezüglich Feuchte und Volumenstrom der Trocknerabluft erfüllt werden. Da ein Volumenstrom von 470.000 Nm³/h trocken mit einer Temperatur von 150 °C nicht alleine durch das Kesselabgas bewerkstelligt werden kann, ist eine Zufeuerung von 14 MW Gas notwendig.

Die vorgegebene Ablufttemperatur von 50–55 °C kann nicht eingehalten werden, da durch die errechnete Feuchtebelastung und Wärmeleistung nicht mehr als 48 °C möglich sind. Die Trocknerabluft hat eine Abwärmeleistung von 30,7 MW feucht und 8 MW trocken – sprich **75 % der Abwärme sind latente Wärme**.

2.4.1 Nasse Abluftreinigung (Biowäscher)

Das Energiefließbild der MDF-Anlage mit nasser Abluftreinigung ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Vorgabe ist eine fast gesättigte Abluft (Feuchte 99 %) am Kamin, womit definiert ist, wie viel Wasser zusätzlich über den Biowäscher bzw. WESP in die Abluft gelangt.

Mittels Extrapolation von bekannten Anlagen wurde ein Stromverbrauch des WESP von 283 kW und des Biowäschers von 50 kW berechnet.

Die Temperatur sinkt bis zum Kamin dadurch auf 42 °C, wobei die latente Abwärme gleich bleibt und sich die Abwärmeleistung der trockenen Abluft auf 7 MW reduziert.

2.4.2 Trockene Abluftreinigung (RNV)

Das Energiefließbild der MDF-Anlage mit trockener Abluftreinigung ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Modellanlage ist bis einschließlich des Nass-Elektrofilters mit der nassen Abluftreinigung ident. Die WESP vor der RNV ist notwendig, um die Staubkonzentration auf ein für die thermische Nachverbrennung nötiges Niveau zu senken.

Der Volumenstrom (trocken: 472.000 Nm³/h; absolute Feuchte: 31,2 t/h) muss für die thermische Nachverbrennung bis auf 800 °C aufgeheizt werden. Wenn die Wärmerückgewinnung außer Acht gelassen wird, müssten dafür **117 MW** bereitgestellt werden.

Durch die Verwendung eines Keramik-Wärmetauschers mit drei Segmenten sinkt die benötigte Leistung auf **7,4 MW**, wobei ca. **10 %** (sprich: 0,7 MW) davon für die **Aufwärmung der Feuchte** in der Abluft benötigt werden.

Am Kamin ergeben sich somit eine Temperatur von 79 °C und 17 % relative Feuchte, was einer Abwärmeleistung von 38 MW (feucht) entspricht (Abluft-Parameter siehe Tabelle 8). Diese Abwärme kann eventuell über Luft/Luft-Wärmetauscher verwendet werden, um die Zuluft vor der Beileimung zu erwärmen.

Tabelle 8:
Rauchgas-Parameter
(Quelle: Allplan).

Volumenstrom trocken	472.726,0	Nm ³ /h
Volumenstrom feucht	648.646,0	Bm ³ /h
Massenstrom trocken	601.598,9	kg/h
Massenstrom feucht	632.799,1	kg/h
Temperatur	79,0	°C
Feuchte absolut	31.200,2	kg/h
Feuchte relativ	17,0	%
Feuchte Beladung	51,9	g/kg tr
Enthalpie feucht	217,1	kJ/kg
Leistung trocken	14.791,0	kW
Leistung feucht	38.156,9	kW

Alle relevanten Stoffstromparameter der vier Modellanlagen sind im Anhang dargestellt.

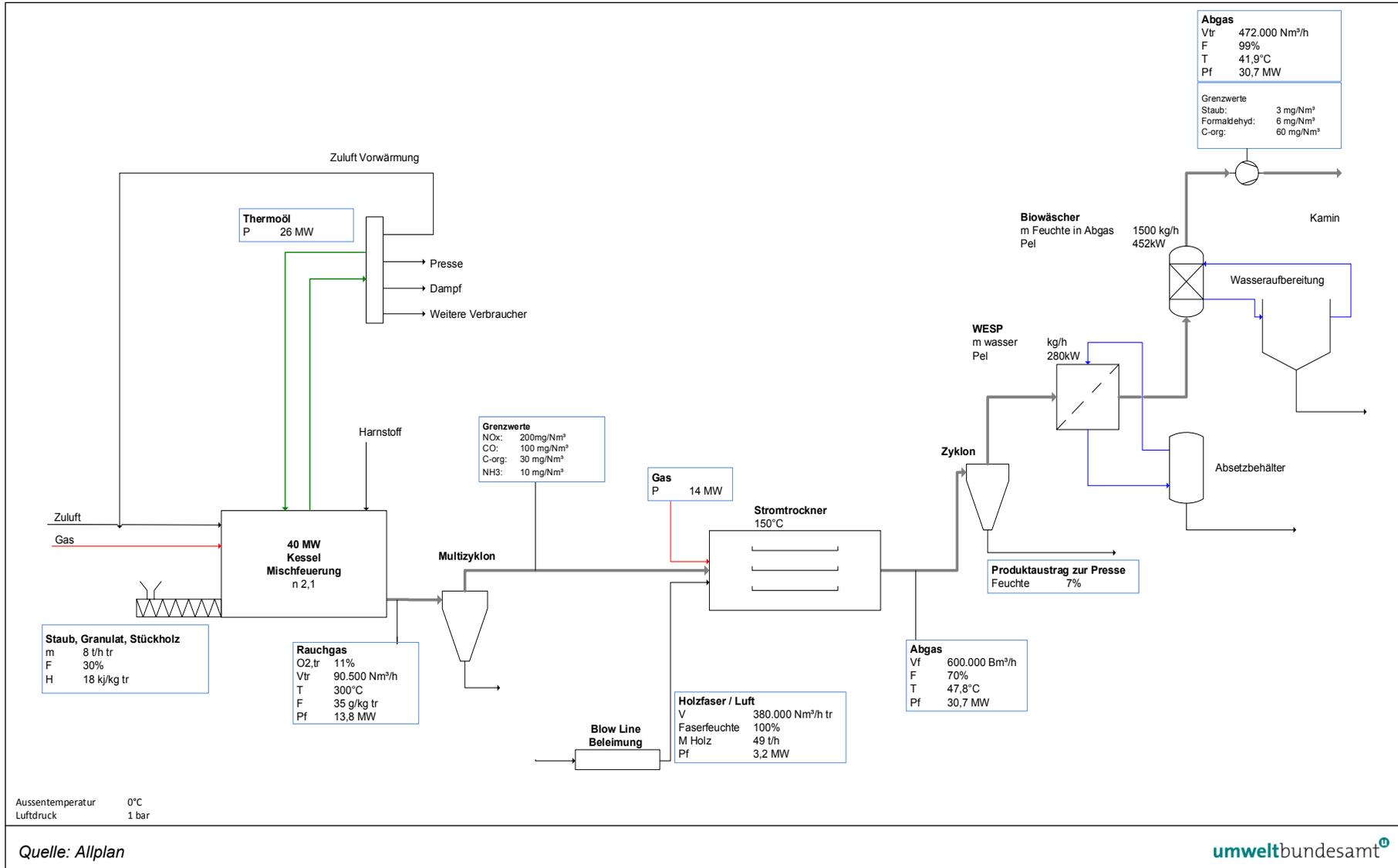


Abbildung 2: MDF Modellanlage – nasse Abluftreinigung.

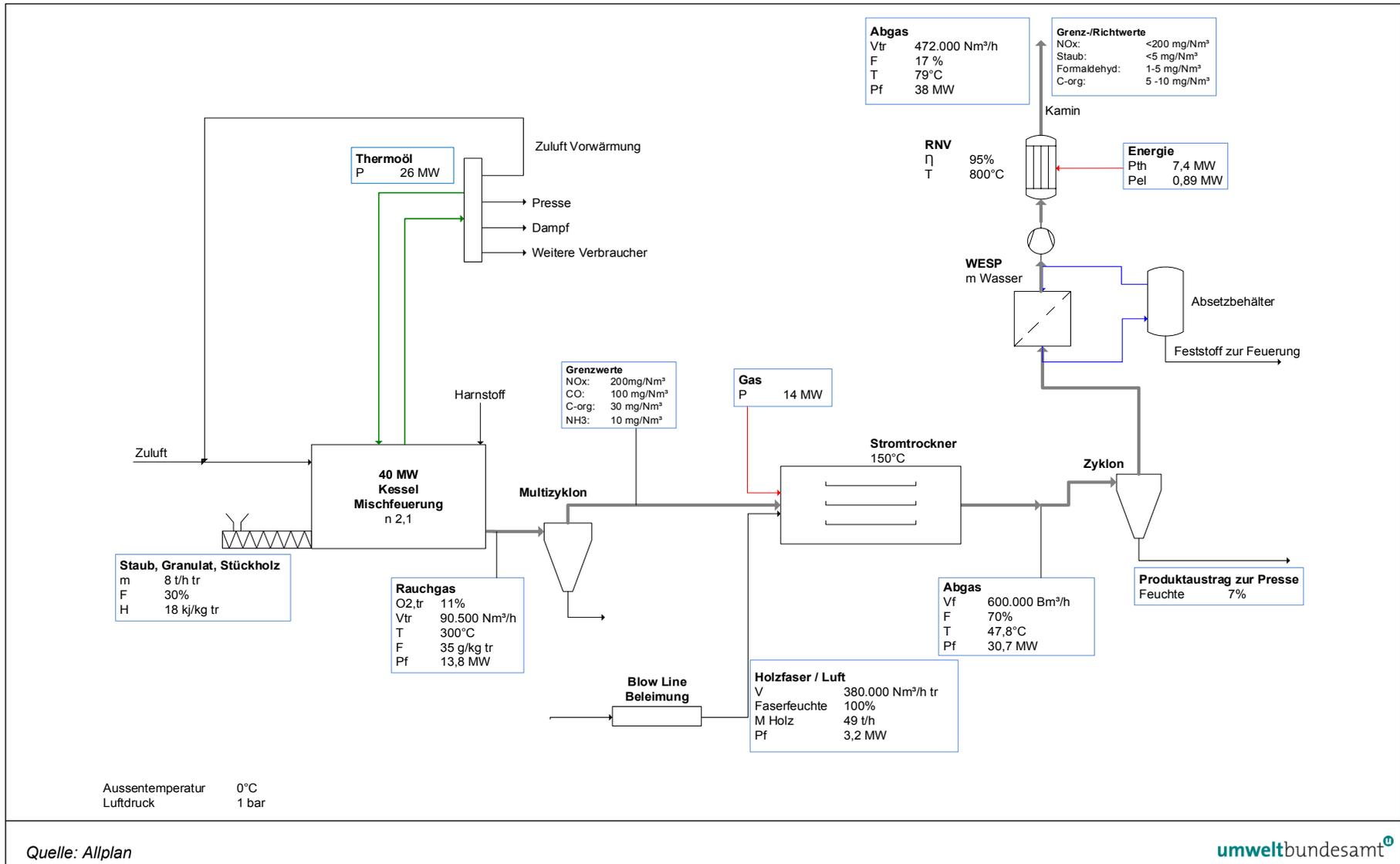


Abbildung 3: MDF Modellanlage – trockene Abluftreinigung.

2.5 Spanplatte – Modellanlage

Der entscheidende Unterschied zwischen der MDF-Modellanlage und der Spanplatten-Modellanlage ist die unterschiedliche Trocknertechnologie. Während bei der MDF-MA ein Stromtrockner mit 150 °C Temperatur zum Einsatz kommt, wird bei der Spanplattenerzeugung ein Trommeltrockner mit 450 °C eingesetzt. Die Volumenströme sind deshalb auch geringer (Zuluft 95.000 Nm³/h), da Luft bei höheren Temperaturen mehr Feuchte aufnehmen kann.

Die Jahresproduktion der Spanplatten-Modellanlage liegt bei 460.000 m³/a, womit man den Abluft-Volumenstrom mit 200.000 Nm³/h definieren kann. Die Produktion ist somit 58 m³/h bzw. 34,5 t/h trocken. Damit ergibt sich bei einer Faserfeuchte von 100 % eine Einsatzmenge von 69 t/h.

Da ein Volumenstrom von ~ 300.000 Nm³/h in der Trocknerabluft vorgegeben ist, reicht die Abwärmeleistung aus dem Kessel ebenfalls nicht aus und es müssen zusätzlich 22 MW mittels Gas direkt in das System eingebracht werden. Die Abwärme beträgt 36,3 MW (feucht).

Die Modellanlagenvorgabe von 120 °C mit 20–30 % Feuchte kann nicht erreicht werden, da über die Späne nicht genug Feuchte ins System eingebracht wird. Die Ablufttemperatur beträgt 72 °C bei 63 % Feuchte. Ein Vergleich zeigt, dass 30 °C Differenz eine Vervierfachung der Enthalpie bewirken.

Temperatur	°C	90	120
Feuchte relativ	%	20	20
Feuchtebeladung	g/kg	101	409
Enthalpie feucht	kJ/kg	360	1.237

*Tabelle 9:
Vergleich relative
Feuchte von 20 % bei
den Temperaturen 90 °C
und 120 °C, Auswirkung
auf die Feuchtebeladung
und die Enthalpie
(Quelle: Allplan).*

2.5.1 Nasse Abluftreinigung

Das Energiefließbild der Spanplattenanlage mit nasser Abluftreinigung ist in Abbildung 4 dargestellt. Die nasse Abluftreinigung mittels Wäscher und WESP benötigt ca. 500 kW elektrische Leistung. Um die 99 % relative Feuchte in der Abluft zu erreichen, werden durch die nasse Behandlung zusätzlich 1,2 t Wasser in den Abluftstrom eingebracht. Die Temperatur sinkt dadurch auf 56 °C bei gleichbleibender Abwärmeleistung – das Verhältnis trockener zu feuchter Abwärmeleistung ist somit 1:6,6.

2.5.2 Trockene Abluftreinigung (RNV)

Das Energiefließbild der Spanplattenanlage mit trockener Abluftreinigung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Im Vergleich zur MDF-Anlage sind die benötigten Leistungen bei der thermischen Nachverbrennung deutlich geringer (3,7 MW_{th}), da der Volumenstrom > 50 % geringer ist. Der Anteil der RNV-Leistung, welcher zur Aufheizung der Feuchte verwendet wird, ist jedoch höher (34 %; 0,95 MW), da die Feuchtebeladung wesentlich größer ist (181 g/kg).

Bei einem RNV-Wirkungsgrad von 95 % beträgt die Gesamtabwärme 40 MW bzw. die trockene Abwärme 7,8 MW.

Tabelle 10:
Spanplatte: Rauchgas-
Parameter
(Quelle: Allplan).

Volumenstrom trocken	198.169,0	Nm ³ /h
Volumenstrom feucht	339.407,0	Bm ³ /h
Massenstrom trocken	246.937,2	kg/h
Massenstrom feucht	291.693,6	kg/h
Temperatur	97,0	°C
Feuchte absolut	44.130,5	kg/h
Feuchte relativ	24,9	%
Feuchte Beladung	173,9	g/kg tr
Enthalpie feucht	583,8	kJ/kg
Leistung trocken	6.876,0	kW
Leistung feucht	40.044,6	kW

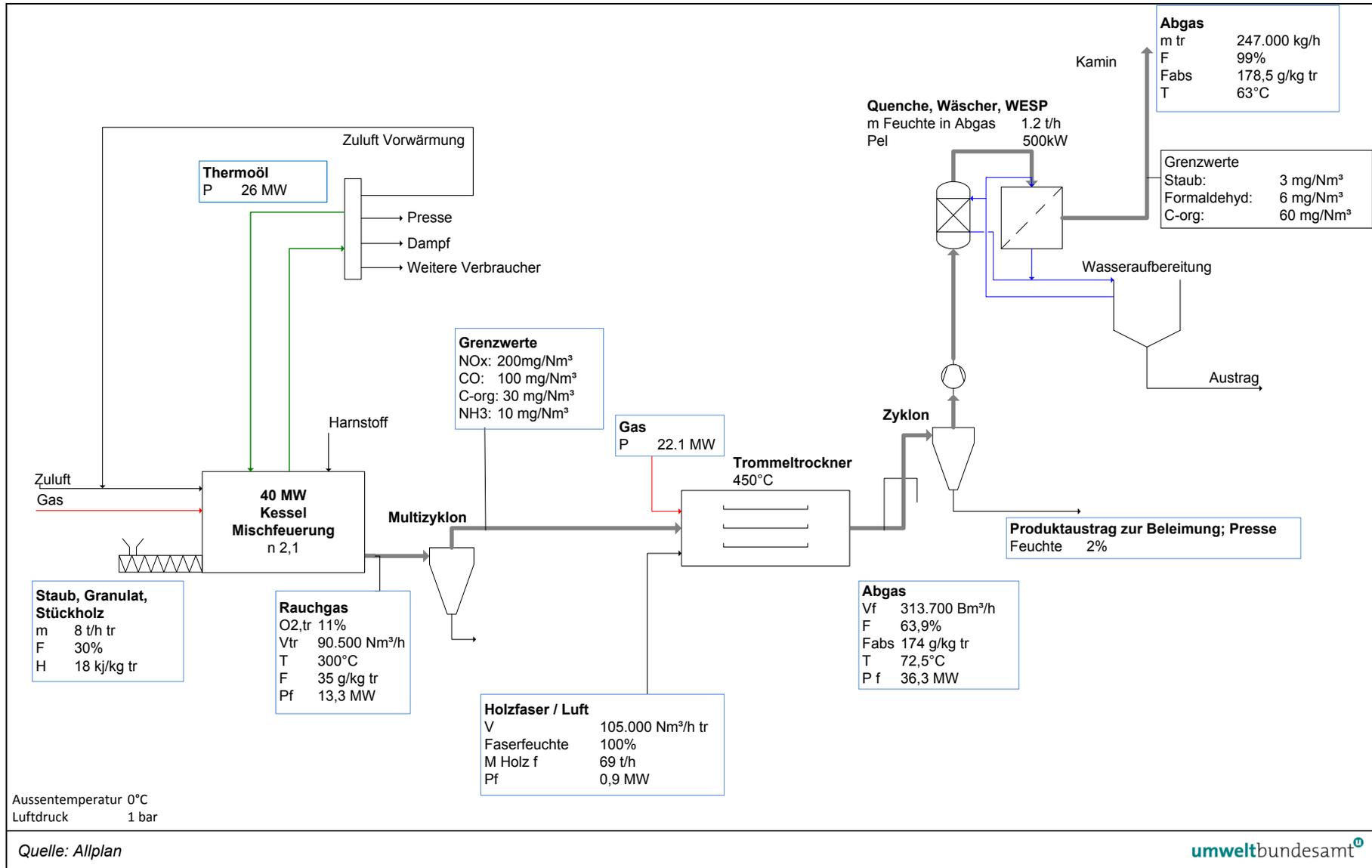


Abbildung 4: Spanplatte Modellanlage – nasse Abluftreinigung.

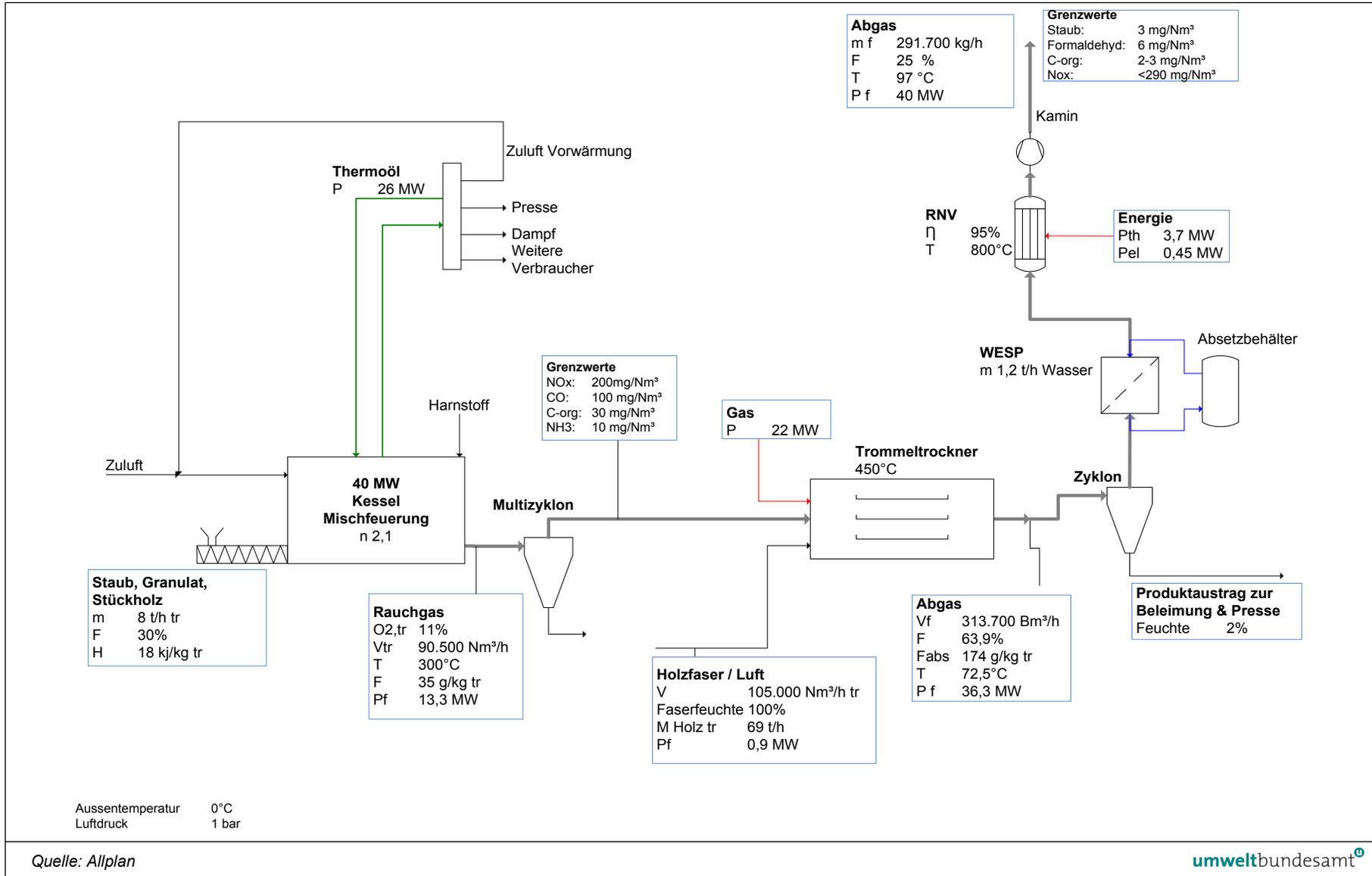


Abbildung 5: Spanplatte Modellanlage – trockene Abluftreinigung.

2.6 Energie- und Kosten Vergleich

Es werden die in Tabelle 11 angegebenen Energiepreise und Betriebsstunden angenommen.

Holz	10	€/MWh
Gas	45	€/MWh
Strom	90	€/MWh
Betriebsstunden	8.000	h

Tabelle 11:
Energiepreise und
Betriebsstunden
(Quelle: Allplan).

Die Kosten werden auf die energietechnisch bilanzierten Anlagen mit nasser (WESP und Biowäscher) und trockener (WESP und RNV) Abluftreinigung angewandt.

2.6.1 MDF-Anlage

Trocknerablufstrom: 472.000 Nm³/h

Der thermische Energiebedarf steigt durch die RNV auf insgesamt 61,4 MW, also um ca. 14 % im Vergleich zur nassen Reinigung. Die monetäre Mehrbelastung ist jedoch über 20 % höher, da für die RNV teures Gas verwendet werden muss.

Der elektrische Energieverbrauch der RNV-Variante ist ebenfalls höher, obwohl der Unterschied mit ~ 840 kW relativ gering ausfällt. Die Kosten steigen um ca. 0,6 Mio. €. Die Wartungskosten erhöhen sich von ca. 400.000 € (Annahme) auf 1.175.000 €/a, wenn ein kompletter Tausch der Keramikelemente alle 2 Jahre durchgeführt wird.

Verfahren	RNV	nass	
thermisch			
Brennstoffeinsatz Kessel	40,0	40,0	MW
Brennstoffeinsatz Trockner	14,0	14,0	MW
Brennstoffeinsatz RNV	7,4	--	MW
Summe	61,4	54,0	MW
Energieverbrauchserhöhung		13,7	%
Kosten Produktion	8.240.000	8.240.000	€
Kosten Gesamt	10.912.565	8.240.000	€
elektrisch			
WESP	0,28	0,28	MW
Biowäscher	--	0,05	MW
RNV	0,89	--	MW
Summe	1,17	0,33	MW
Kosten	844.280	235.880	€
Wartung	1.175.000	396.896	€
Gesamt Summe	12.931.845	8.868.920	€

Tabelle 12:
MDF Energie/
Kostenvergleich
(Quelle: Allplan).

Verfahren	RNV	nass	
Zusatzkosten	4.062.925		€
relative Kostenerhöhung	45,8		%
Investitionskosten			
Abluftreinigung	6.100.000	4.500.000	€

Insgesamt ergeben sich jährliche Mehrbelastungen von **4,1 Mio. €** bzw. steigen die Betriebskosten um **45,8 %**. Die geschätzten **Investitionskosten** bei 600.000 Bm³/h für eine RNV-Anlage betragen **6,1 Mio. €** wobei die Investitionskosten für die nasse Abluftbehandlung bei **4,5 Mio. €** liegen.

2.6.2 Spanplatten-Anlage

Trocknerabluftstrom: 198.000 Nm³/h

Durch die geringeren Volumenströme bei der Spanplattenproduktion im Vergleich zur MDF-Anlage steigt der thermische Energieverbrauch für die betrachteten Hauptverbraucher nur um 6 % auf insgesamt 66 MW.

Der elektrische Verbrauch ist mit 850 kW um 350 kW höher als bei der nassen Reinigung, jedoch ist insgesamt der elektrische Energieverbrauch der Reinigung nur 10 % des therm. Energieverbrauchs.

Die Wartungskosten (kompletter Tausch der Keramikelemente alle 2 Jahre für die RNV) erhöhen sich von 50.000 € (Annahme) auf 500.000 €/a. Die Gesamtenergiekosten der RNV-Variante betragen 13,63 Mio. € und liegen um 17,6 % höher als die Energiekosten der nassen Variante (11,6 Mio. €).

Die geschätzten **Investitionskosten** für eine für die RNV Anlage bei 300.000 Bm³/h betragen 3,6 Mio.€.

Tabelle 13:
Spanplatte
Energie/Kostenvergleich
(Quelle: Allplan).

Verfahren	RNV	nass	
thermisch			
Brennstoffeinsatz Kessel	40,0	40,0	MW
Brennstoffeinsatz Trockner	22,2	22,2	MW
Brennstoffeinsatz RNV	3,7		MW
Summe	65,9	62,2	MW
Energieverbrauchserhöhung	6,0		%
Kosten	12.520.400	11.184.800	€
elektrisch			
RNV	0,35		MW
Wäscher, WESP	0,50	0,50	MW
Summe	0,85	0,50	MW
Kosten	612.000	360.000	€
Wartung	500.000	50.000	€
Gesamt Summe	13.632.400	11.594.800	€
Zusatzkosten	2.037.600		€
relative Kostenerhöhung	17,6		%
Investitionskosten			
RNV-Anlage	3.500.000		€

2.7 Kondensieren der Abluftfeuchte

2.7.1 MDF-Anlage

Die Abluft des Trockners hat 48 °C bei einer Feuchte von 70 % und einem Volumenstrom von 472.000 Nm³/h (trocken!), was 600.000 Bm³/h feucht entspricht. Die Feuchtbeladung beträgt somit 31.200 kg/h bzw. der trockene Luftmassenstrom 601.000 kg/h. Der Dampfmassenstrom beträgt im Vergleich zum Trockenmassenstrom nur 5 %, jedoch ist die spezifische Wärmekapazität von Dampf doppelt so groß wie von Luft.

Wenn eine thermische Nachverbrennung installiert wird, muss der gesamte Volumenstrom auf 800 °C erhitzt werden. Theoretisch müssen für die Erwärmung des Trockenmassenstroms 134,4 MW und für den Dampfmassenstrom 13,7 MW zur Verfügung gestellt werden, um die vorgeschriebene Temperatur zu erreichen. Durch die regenerativen Wärmetauscher beträgt die tatsächliche Leistung nur 5 %, sprich 6,7 MW für Trockenluft und 0,7 MW für Dampf (siehe Tabelle 14).

Würde die Feuchte in der Abluft kondensiert, dann wäre ein Aufheizen des Dampfes nicht mehr notwendig. Ein Kondensieren der Abluftfeuchte kann nur über einen vorgeschalteten Luft/Wasser-Wärmetauscher bewerkstelligt werden.

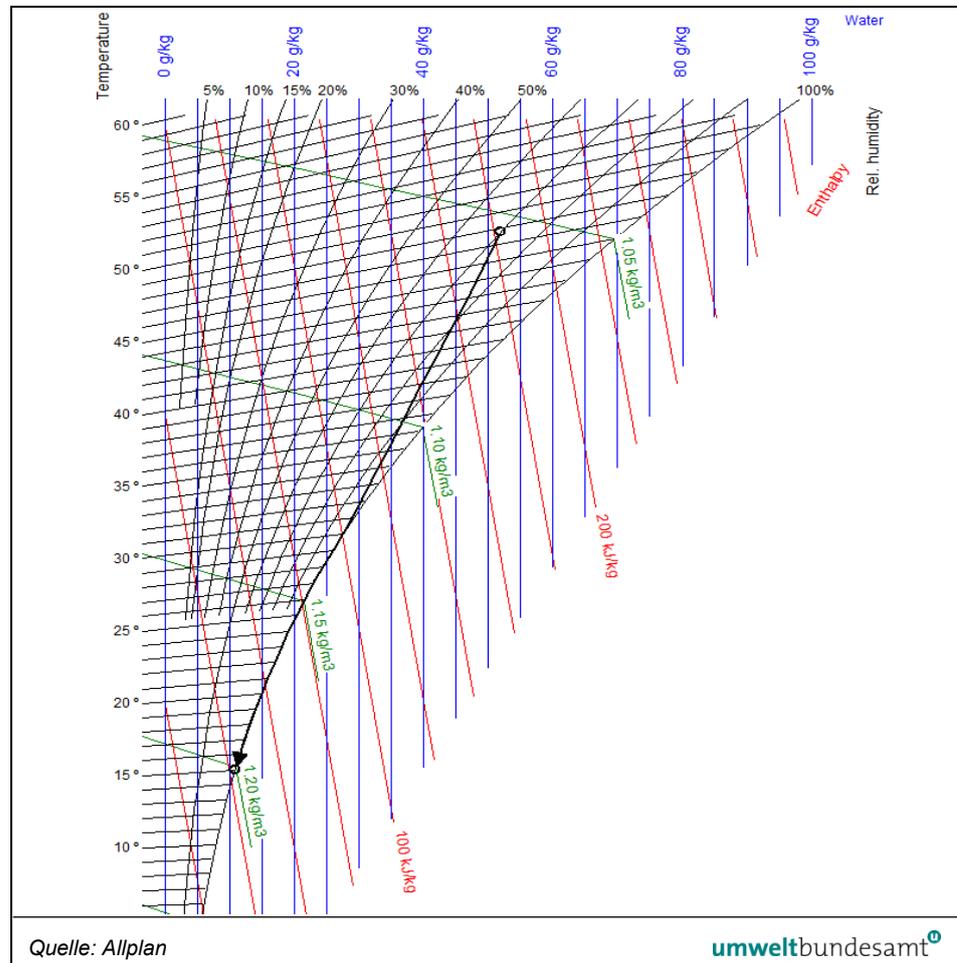
Temperatur nach Trockner	48	°C
geforderte Temperatur für thermischer Nachverbrennung	800	°C
trockene Luft		
Volumenstrom (trocken)	471.979,9	Nm ³ /h
Dichte	1,275	kg/m ³
cp Luft (400 °C)	1,069	kJ/kgK
Aufheizleistung für trockene Luft	134,4	MW
Feuchte		
absolute Feuchte Abluft	31.200,0	kg/h
cp Dampf	2,1	kJ/kgK
Aufheizleistung für Feuchte	13,7	MW
RNV-Wirkungsgrad	95	%
benötigte Gasleistung trockene Luft	6,7	MW
benötigte Gasleistung Feuchte	0,7	MW
Gesamt RNV-Gasleistung (ohne Kondensation)	7,4	MW
Anteil Gasleistung für Feuchteerwärmung	9,2	%
Kondensieren der Abluft (Luft/Wasser WT)		
Zielfeuchte der Abluft	10	g/kg
rel. Feuchte	100	%
anfallende Kondensatmenge	24.727	kg/h
Ablufttemperatur nach Kondensation	15	°C
Kondensationsleistung	23,4	MW
Kühlwasser		
Kühlwassertemperatur ein	10	°C

*Tabelle 14:
Gasleistung
feuchte/trockene Abluft
(Quelle: Allplan).*

Kühlwassertemperatur aus	25	°C
benötigte Kühlwassermenge	371	m³/h
Aufheizleistung trockene Luft	140,3	MW
Aufheizleistung Feuchte	3,0	MW
Aufheizleistung Gesamt	143,2	MW
RNV Gasleistung (mit Kondensation)	7,2	MW
erhöhte Gasleistung – ohne Kondensation	0,24	MW
zusätzl. elektr. Leistung P&V – mit Kondensation	0,17	MW
Energiekostendifferenz – ohne Kondensation	- 35.544	€

Da eine komplette Kondensation der Abluft wegen zu niedriger Temperaturen nicht möglich ist, wird eine Zielfeuchte von 10 g/kg angesetzt. Bei Kühlwassertemperaturen von 10 °C bzw. 25 °C im Vor- und Rücklauf wäre ein Kühlwasservolumenstrom von 371 m³/h nötig, um die geforderte Kühlleistung von 23,4 MW zu realisieren. In Abbildung 6 ist die Abkühlkurve im Hx-Diagramm darstellt.

Abbildung 6:
Hx Diagramm: Abluft-
Kondensation.



Um eine Zielfeuchte von 10 g/kg zu erreichen, muss die Abluft auf 15 °C abgekühlt werden. Dadurch ergibt sich eine RNV-Gasleistung von 7,2 MW, welche somit nur unwesentlich geringer ist (0,24 MW) als die RNV-Leistung für feuchte Abluft (7,4 MW). Wenn die erhöhten Pump- und Ventilatorkosten gegengerechnet werden, so ist die **feuchte Fahrweise geringfügig billiger**.

Die gewonnene Wärmeenergie über das Kühlwasser kann nicht eingesetzt werden, da das Temperaturniveau für eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Nutzung zu niedrig ist.

Falls jedoch eine Kondensation vor der RNV installiert werden würde, wäre das Abwärmepotenzial nach der RNV nicht mehr gegeben.

Durch die Kondensation fallen 24,7 m³/h an Abwasser an. Die somit anfallenden Abwasser-Behandlungskosten würden die gestiegenen Kosten noch weiter erhöhen. Bei einer Indirekteinleitung von Industrieabwässern ist mit Zusatzkosten von ca. 100.000 €/a im Jahr zu rechnen.

2.8 Wärmerückgewinnung: Nutzung der erhöhten Ablufttemperatur nach der RNV

Da durch die RNV-Anlagen ein höheres Temperaturniveau in der Abluft entsteht, wird die Möglichkeit einer Wärmerückgewinnung untersucht. Durch die niedrigen Ablufttemperaturen von 78 °C bzw. 96 °C wird auf die weitere Betrachtung einer Fernwärmeausspeisung verzichtet, zumal die Fernwärmepreise im Normalfall weit unter den Gaseinkaufspreisen liegen (20–30 €/MWh im Vergleich zu 50 €/MWh) und somit die Wirtschaftlichkeit reduziert wird.

Die interessanteste Option ist das Vorwärmen der Trocknerzuluft, da wegen des großen Volumenstroms die benötigten Leistungen hoch, die Temperaturen hingegen niedriger sind und die Einbindung in das gleiche System (Trockner) betriebstechnisch sinnvoll ist.

2.8.1 MDF-Anlage

Durch die hohen Volumenströme und der Luftfeuchtigkeit wurde davon abgesehen, einen direkten Luft/Luft-Wärmetauscher vorzuschlagen, da jener enorme Dimensionen hätte. Weiters würde durch den Kontakt mit kalter Luft die Feuchte in der Abluft kondensieren, wodurch eine Edelstahl-Ausführung notwendig wäre. Edelstahl-Wärmetauscher kosten in der Regel das 3-Fache von normalen Stahlkonstruktionen. Dadurch würde der Wärmetauscher über 1 Mio. € kosten.

Durch die Ausführung als Wärmetauscher-Verbund mit einem zwischengeschalteten Wasser-Kreislauf kommt es in der Regel zu keiner Kondensation, da die Wassertemperaturen mit 42/62 °C Vorlauf und Rücklauf hoch genug sind. Die minimale Außentemperatur für einen kondensationsfreien Betrieb wäre – 10 °C. Wenn die Temperatur weiter absinken würde, müsste entweder warmes Wasser zugemischt oder die WRG umfahren werden (Bypass).

Fallbeispiele zeigen, dass beim Abluft-Wärmetauscher eine Edelstahl-Ausführung zweckmäßig ist, da im Realfall bei den herrschenden Abluft-Konditionen eine Kondensation nicht ausgeschlossen werden kann.

Trotzdem können durch die Bauart die hohen Investitionskosten für lange, teure Lüftungskanäle vermieden werden. Die Distanzen zwischen Zu- und Abluft werden mit dem Wasserrohrkreislauf bewerkstelligt.

In Tabelle 15 sind die Dimensionen der Abluft- und Zuluft-Wärmetauscher dargestellt. Abluft-Wärmetauscher ist mit 28,2 t fast doppelt so schwer wie der Zuluft-Wärmetauscher (15,6 t).

Tabelle 15:
MDF-Wärmetauscher
(Quelle: Allplan).

Wärmetauscher	Rippenrohr – Stahl verzinkt		
	Abluft	Zuluft	
Gewicht	28,2	15,6	t
Dimension	7,1 x 5 x 0,9	6,1 x 4,7 x 0,6	m

Bei einer Zulufttemperatur von 10 °C wird die Abluft von 79 °C auf 48 °C abgekühlt, wodurch die relative Feuchte von 19 % auf 71 % ansteigt. Aufgrund der Vermeidung der Kondensation ist die übertragene Leistung niedriger als bei einem direkten Luft/Luft-Wärmetauscher. Der Zuluft-Volumenstrom (380.000 Nm³) wird auf 49 °C aufgeheizt, was einer übertragenen Wärmeleistung von 5,35 MW entspricht (siehe Tabelle 16).

Die somit erhöhte Trockner-Zulufttemperatur senkt die direkt benötigte Gasleistung beim Trockner. Die Gasleistung sinkt somit von 14 MW auf 8,7 MW. In Abbildung 7 ist das Fließbild der MDF-Anlage mit RNV und Wärmerückgewinnung dargestellt.

Tabelle 16:
Wärmerückgewinnung –
MDF-Anlage
(Quelle: Allplan).

	ein	aus	
Rauchgas			
Volumenstrom		472.720	Nm ³ /h
Druckabfall		726	Pa
Temperatur	79,0	48,2	°C
relative Feuchte	17	69	%
Zuluft			
Volumenstrom		380.000	Nm ³ /h
Druckabfall		418	Pa
Temperatur	10,0	49,0	°C
relative Feuchte	70	7	%
Kühlwasser			
Vol.str.		234	m ³ /h
Druckabfall	32.700	20.860	Pa
Temperatur	42,0	62,0	°C
WRG Leistung			5.355,0 kW
Kondensatanfall		0,0	m ³ /h

Durch die Wärmerückgewinnung nach der RNV-Anlage beträgt der Mehrverbrauch gegenüber einer nassen Abluftreinigung 2,1 MW bzw. ca. 4 % des Gesamtbrennstoffeinsatzes. Der Stromverbrauch steigt ebenfalls aufgrund von zusätzlichen Ventilator- und Pumpleistungen von 0,33 MW (nasse Abluftreinigung) auf 1,38 MW.

Insgesamt steigen die Energiekosten von 8,9 Mio. € auf 11,1 Mio. €, entsprechend einer relativen Kostenerhöhung von 25,7 %.

Verfahren		RNV	nass	
thermisch				
	Brennstoffeinsatz Kessel	40,0	40,0	MW
	Brennstoffeinsatz Trockner	8,7	14,0	MW
	Brennstoffeinsatz RNV	7,4	--	MW
	Summe	56,1	54,0	MW
	Energieverbrauchserhöhung	3,9		%
	Kosten	8.979.890	8.240.000	€/a
elektrisch				
	WESP	0,28	0,28	MW
	Biowäscher	--	0,05	MW
	RNV	0,89	--	MW
	WRG: Pumpe & Ventilator	0,21		MW
	Summe	1,38	0,33	MW
	Kosten	992.354	236.024	€/a
	Wartung	1.175.000	392.896	€/a
Gesamt	Energie Summe	460	435	GWh
	Kosten Summe	11.147.243	8.868.920	€/a
	Zusatzkosten	2.278.323		€/a
	relative Kostenerhöhung	25,7		%

Tabelle 17:
Energie- und
Kostenbilanz – MDF-
Anlage mit WRG
(Quelle: Allplan).

Der Vergleich der Energiekosten mit bzw. ohne Wärmerückgewinnung (siehe Tabelle 18) zeigt, dass mittels der Wärmerückgewinnung **1,78 Mio. € an Energiekosten gespart** werden.

Die **Investitionskosten** betragen **1,55 Mio. €**, wodurch sich die **Investition innerhalb von einem Jahr amortisiert** (Berechnung im Anhang).

Gesamtenergiekosten ohne WRG	12.931.845	€
Gesamtenergiekosten mit WRG	11.147.243	€
jährliche Kosteneinsparung	1.784.602	€
Investitionskostenschätzung WRG	1.550.000	€
Amortisation	0,9	a

Tabelle 18:
Wirtschaftlichkeit WRG
– MDF Modell
(Quelle: Allplan).

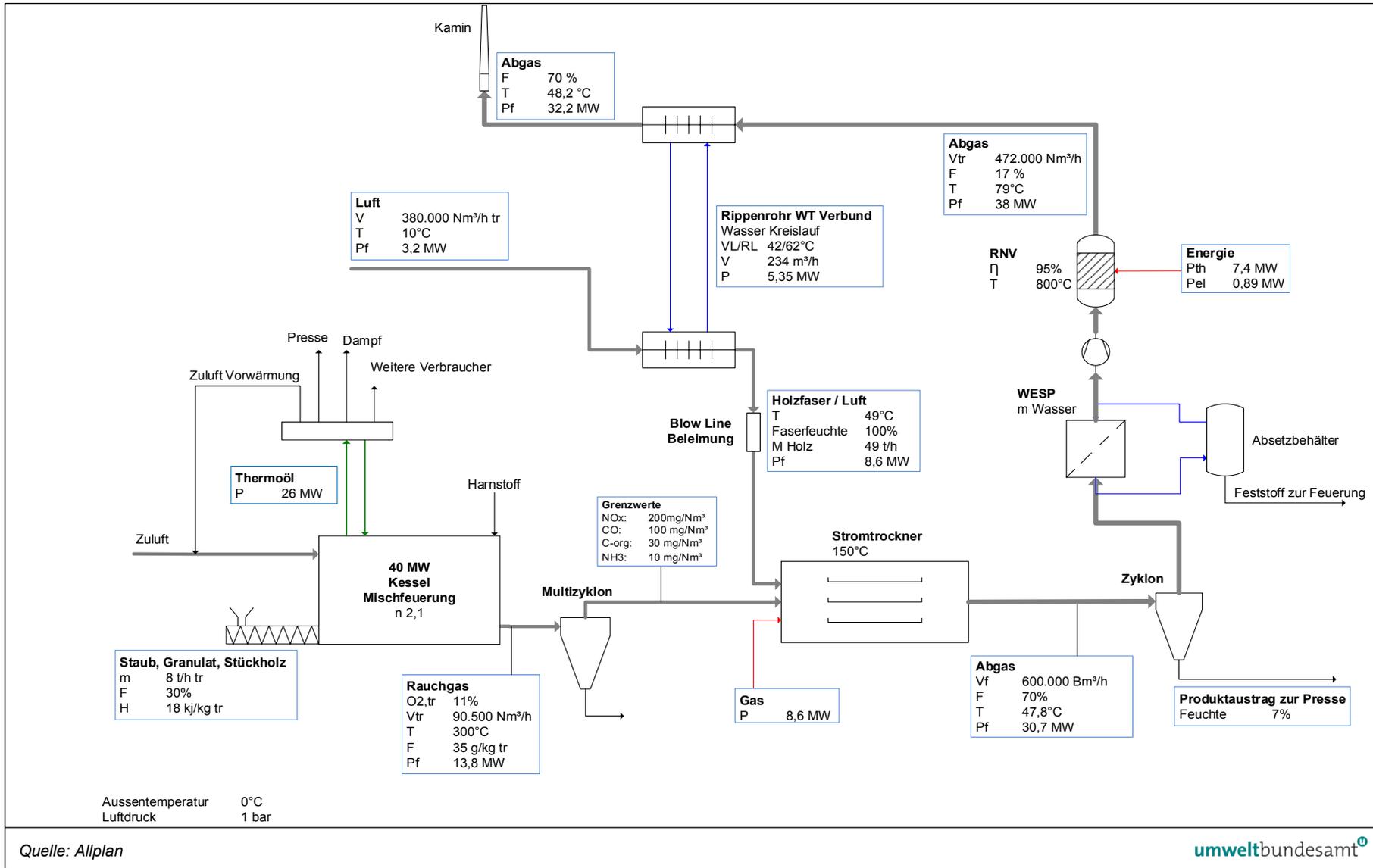


Abbildung 7: MDF Modellanlage mit WRG.

2.8.2 Wärmerückgewinnung Spanplatte

Die Wärmetauscher fallen wegen der geringeren Volumenströme bedeutend kleiner und leichter aus. So wiegt der Spanplatten-Abluftwärmetauscher nur 30 % des MDF-Abluftwärmetauschers.

Wärmetauscher	Rippenrohr – Stahl verzinkt		
	Abluft	Zuluft	
Gewicht	8,2	4,3	t
Dimension	6,1 x 2,5 x 0,6	3,6 x 2,1 x 0,6	m

Tabelle 19:
Spanplatte
Wärmetauscher
(Quelle: Allplan).

Die Abluft wird von 97 °C auf 76 °C abgekühlt, wodurch die relative Feuchte auf 56 % steigt. Der Wasserzwischenkreislauf hat ein Vor-/Rücklaufniveau von 80/60 °C, weshalb es zu keiner Kondensation am Abluftwärmetauscher kommt, und eine Wärmeleistung von 1,95 MW übertragen wird.

	ein	aus	
Rauchgas			
Volumenstrom		198.169	Nm ³ /h
Druckabfall		446	Pa
Temperatur	97	76	°C
relative Feuchte	25	56	%
Zuluft			
Volumenstrom		105.000	Nm ³ /h
Druckabfall		402	Pa
Temperatur	10	63	°C
relative Feuchte	70	4	%
Kühlwasser			
Volumenstrom		85	m ³ /h
Druckabfall	73.000	64.000	Pa
Temperatur	60	80	°C
WRG-Leistung feucht		1.950	kW
Kondensatanfall		0	m ³ /h

Tabelle 20:
Spanplattenlinie –
Wärmerückgewinnung
(Quelle: Allplan).

Durch die Wärmerückgewinnung steigt der thermische Energieverbrauch insgesamt um 2,8 % auf 64 MW. Der elektrische Energieverbrauch bliebe mit RNV und Wärmerückgewinnung gleich hoch wie bei einer nassen Abluftreinigung. Somit ergibt sich ein Gesamtenergieverbrauch von 519 GWh gegenüber 501 GWh bei der derzeitigen Anlagekonstellation. Die Gesamtbetriebskosten steigen um 11,8 % auf 12,97 Mio. €.

Tabelle 21:
Energie- und
Kostenbilanz –
Spanplatten-Anlage mit
WRG (Quelle: Allplan).

Verfahren	RNV	nass	
thermisch			
Brennstoffeinsatz Kessel	40,0	40,0	MW
Brennstoffeinsatz Trockner	20,2	22,2	MW
Brennstoffeinsatz RNV	3,7		MW
Summe	63,9	62,2	MW
Energieverbrauchserhöhung	2,8		%
Kosten	11.818.400	11.184.800	€
elektrisch			
Wäscher, WESP	0,50	0,50	MW
RNV	0,35		MW
WRG: Pumpe & Ventilator	0,05		MW
Summe	0,90	0,5	MW
Kosten	648.532	360.000	€
Wartung	500.000	50.000	€
Gesamt Energie Summe	518,7	501,4	GWh
Kosten Summe	12.966.932	11.594.800	€
Zusatzkosten	1.372.132		€
relative Kostenerhöhung	11,8		%

Die Wärmerückgewinnung reduziert die Energiekosten jährlich um **0,67 Mio. €**. Bei Investitionskosten von **0,64 Mio. €** amortisiert sich die Investition innerhalb eines Jahres (Berechnung im Anhang).

Tabelle 22:
Wirtschaftlichkeit WRG
– Modell Spanplatte
(Quelle: Allplan).

Gesamtenergiekosten ohne WRG	2.037.600	€
Gesamtenergiekosten mit WRG	1.372.132	€
jährliche Kosteneinsparung	665.468	€
Investitionskostenschätzung WRG	640.000	€
Amortisation	1	a

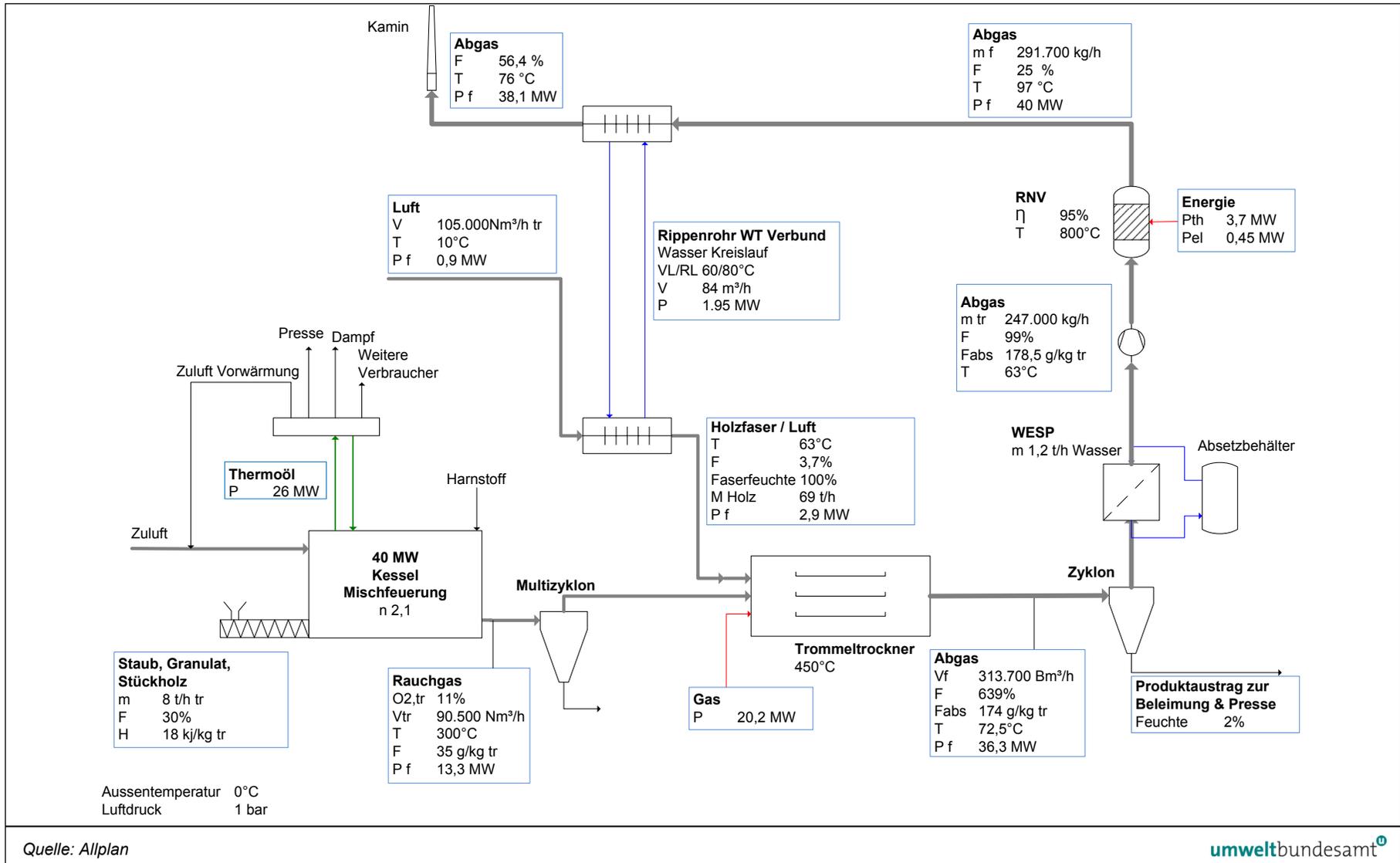


Abbildung 8: Spanplatte Modellanlage mit WRG.

2.9 Kostendarstellung – Übersicht

In den folgenden Tabellen werden nochmals alle relevanten Kosten für die jeweiligen Anlagen dargestellt, wobei zwischen den Varianten RNV mit bzw. ohne Wärmerückgewinnung unterschieden wird. Unter laufenden Kosten werden sowohl Energie- als auch Wartungskosten verstanden, welche für die Produktion und Abluftreinigung aufgewendet werden müssen. Bei den Investitionskosten wird zwischen Abluftreinigung und Wärmerückgewinnung unterschieden. Bei den Berechnungen wurden keine Energiepreiserhöhungen berücksichtigt, aber ein konstanter Zinssatz von 6 % angenommen.

2.9.1 MDF Modellanlage

Abluftvolumenstrom: 472.000 Nm³/h; 600.000 Bm³/h

Produktionsmenge: 320.000 m³/a

Tabelle 23: Kostenvergleich MDF Trockner (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

	RNV ohne WRG	RNV mit WRG	nass	Einheit
Betriebskosten (BK) Energie				
thermische Energie	10.912.565	8.979.890	8.240.000	€/a
● Produktion	8.240.000	6.314.000	8.240.000	€/a
● Reinigung	2.672.565	2.665.890	0	€/a
elektrische Energie für Reinigung	844.280	992.354	236.024	€/a
Wartung*	1.175.000	1.175.000	392.896	€/a
Gesamt BK Energie	12.931.845	11.147.243	8.868.920	
Investitionskosten (IK)				
Abluftreinigung	6.100.000	6.100.000	4.500.000	€
Wärmerückgewinnung		1.550.000	0	€
Gesamt IK	6.100.000	7.650.000	4.500.000	€
IK inkl. Zinsen/Jahr	1.092.417	1.369.999	805.881	€/a
(10 Jahre, 6 % Zinsen)				
Spezifische Kennzahlen				
Betriebskosten (BK) Abluftreinigung	4.691.845	2.907.243**	628.920	€/a
Investitionskosten/Jahr (IK) Abluftreinigung	1.092.417	1.369.999	805.881	€/a
BK + IK Abluftreinigung	5.784.262	4.277.242	1.434.801	€/a
Produktionsmenge (PM)			320.000	m ³ /a
Produktpreis			210	€/m ³
BK Abluftreinigung pro PM	14,7	9,1	2,0	€/m ³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK)	7,0	4,3	0,9	€/m ³
BK + IK Abluftreinigung pro PM	18,1	13,4	4,5	€/m³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK + IK)	8,6	6,4	2,1	%

* In den Wartungskosten für die regenerative Nachverbrennung wurde ein regelmäßiger Füllkörpertausch miteinbezogen, um den Wärmerückgewinnungswirkungsgrad innerhalb der Anlagen bei 95 % zu halten. Außerdem wurde in den Wartungskosten berücksichtigt, dass bei einem Eingangsstaubgehalt von 10 mg/Nm³ wiederkehrende Reinigungsarbeiten nötig sind.

** Die Kosteneinsparungen der Wärmerückgewinnung sind eigentlich Produktionskosteneinsparungen, da diese den Gaseinsatz des Trockners reduzieren; die Einsparungen wurden jedoch zur besseren Veranschaulichung gegen den Gaseinsatz in der RNV gerechnet.

Zweistufige MDF-Fasertrockner, die bei gleichem Abluftvolumenstrom wie herkömmliche Trockner ungefähr die doppelte Menge an Platten produzieren können, weisen dementsprechend die halbierten Abluftreinigungskosten, bezogen auf die Produktionsmenge, auf. Die Reinigungskosten beim Zweistufentrockner werden ident zum im Modell abgebildeten Trockner aufgrund desselben Abluftvolumenstromes angenommen.

	RNV ohne WRG	RNV mit WRG	nass	Einheit
Investitionskosten (IK)				
Abluftreinigung	6.100.000	6.100.000	4.500.000	€
Wärmerückgewinnung		1.550.000		0 €
Gesamt IK	6.100.000	7.650.000	4.500.000	€
IK inkl. Zinsen/Jahr	1.092.417	1.369.999	805.881	€/a
(10 Jahre, 6 % Zinsen)				
Spezifische Kennzahlen				
Betriebskosten (BK) Abluftreinigung	4.691.845	2.907.243*	628.920	€/a
Investitionskosten/Jahr (IK) Abluftreinigung	1.092.417	1.369.999	805.881	€/a
BK + IK Abluftreinigung	5.784.262	4.277.242	1.434.801	€/a
Produktionsmenge (PM)			450.000	m ³ /a
Produktpreis			210	€/m ³
BK Abluftreinigung pro PM	10,5	6,5	1,4	€/m ³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK)	5,0	3,1	0,7	
BK + IK Abluftreinigung pro PM	12,9	9,5	3,2	€/m³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK + IK)	6,1	4,5	1,5	%

Tabelle 24:
Kostenvergleich MDF-Zweistufentrockner
(Quelle: Allplan,
Umweltbundesamt).

* Die Kosteneinsparungen der Wärmerückgewinnung sind eigentlich Produktionskosteneinsparungen, da diese den Gaseinsatz des Trockners reduzieren; die Einsparungen wurden jedoch zur besseren Veranschaulichung gegen den Gaseinsatz in der RNV gerechnet.

Vorteil aus der Wärmerückgewinnung

Es ist deutlich zu erkennen, dass die jährlichen Kostensteigerungen gegenüber dem Status quo bei Installation einer RNV inkl. Wärmerückgewinnung nur 70 % der Kostensteigerung entsprechen, falls keine Wärmerückgewinnung eingesetzt wird (siehe auch Kapitel 2.8).

Des Weiteren sind die Investitionskosten der Wärmerückgewinnung bedeutend geringer (15 %) als die der RNV Anlage, weshalb bei einer Realisierung beide Projekte umgesetzt werden sollten.

Kosten der Abgasreinigungsvarianten

Die Summe der jährlichen Betriebs- und Investitionskosten beträgt bei der nassen Abluftreinigung ca. 1,4 Mio. €. Demgegenüber beträgt die Summe bei der RNV mit Wärmerückgewinnung ca. 4,3 Mio. €, ohne Wärmerückgewinnung ca. 5,8 Mio. €.

Tabelle 23 (MDF-Trockner mit Produktionsvolumen von 320.000 m³/a) zeigt ebenso, dass die jährlichen Betriebskosten die jährlichen Investitionskosten (6 % Verzinsung, Laufzeit 10 Jahre) bei Einsatz der RNV im Gegensatz zur nassen Abluftreinigung übersteigen.

Bei einem angenommenen Produktpreis von 210 €/m³ und 320.000 m³ Produktion pro Jahr ergeben sich spezifische Abluftreinigungskosten (Betriebs- und Investitionskosten) von 4,5 €/m³ bei Einsatz von Nasswäschern. Die Kosten steigen bei Emissionsminderung mittels RNV auf 13,4 €/m³ (mit WRG) bzw. 18,1 €/m³ (ohne WRG). Die Kostenanteile vom Produktpreis erhöhen sich von 2,1 % bei Nassreinigung auf 6,4 % bei der RNV mit WRG bzw. 8,6 % ohne WRG.

Das für die Modellanlage herangezogenen Verhältnis von Volumenstrom zu Produktionsverhältnis (ca. 1,5) liegt im Mittel der europäischen Werte (siehe Anhang Tabelle 28).

Bei einem Verhältnis von ca. 1:1 von Abluftvolumenstrom zu Produktion (450.000 m³/a) (siehe Tabelle 24) betragen die spezifischen Abluftreinigungskosten (Betriebs- und Investitionskosten) bei Einsatz von Nasswäschern 3,2 €/m³, was 1,5 % des Produktpreises entspricht. Die Kosten erhöhen sich bei Einsatz der Nachverbrennung mit Wärmerückgewinnung auf 9,5 €/m³ bzw. 4,5 % des Produktpreises. Ohne Wärmerückgewinnung beträgt die Steigerung 12,9 €/m³ bzw. 6,1 % des Produktpreises.

MDF-Fasertrockner mit hohem Frischluftanteil weisen ein Verhältnis von Produktionsmenge zu Abluftvolumenstrom von ca. 1:2 auf. Dementsprechend sind die Abluftreinigungskosten, bezogen auf die Produktionsmenge höher. Die spezifischen Abluftreinigungskosten betragen bei Einsatz von Nasswäschern 6,4 €/m³, was 3,0 % des Produktpreises entspricht. Die Kosten erhöhen sich bei Einsatz der Nachverbrennung mit WRG auf 19,0 €/m³ bzw. 9,1 % des Produktpreises. Ohne WRG beträgt die Steigerung 25,7 €/m³ bzw. 12,2 % des Produktpreises.

Spezifische Kosten VOC-Minderung

Der VOC-Abscheidegrad bei nassarbeitenden Wäschern beträgt gemäß VDI Richtlinie 3462 Blatt 2 10–30 %. Für die Berechnungen der spezifischen VOC-Minderungskosten wird mit 30 % Minderung gerechnet. Bei einem Reingaswert von 65 mg/Nm³ ergibt sich eine Rohgaskonzentration von ca. 93 mg/Nm³. Nassarbeitende Wäscher scheiden bei einem Abgasvolumenstrom 472.000 Nm³/h und 8.000 Betriebsstunden ca. 105 t/a ab. Bei der RNV beträgt der Anteil an geminderten VOC-Emissionen bei einem Abscheidegrad von ca. 98 % 343 t/a.

Die spezifischen VOC-Minderungskosten errechnen sich aus den absolut geminderten VOC-Mengen und den in Tabelle 26 dargestellten Betriebs- und Investitionskosten. Für die nasse Abluftreinigung der Trocknerabgase ergeben sich spezifische Kosten von 5.979 €/t VOC (nur BK) bzw. 13.640 €/t VOC (BK + IK).

Durch den Einsatz einer RNV verändern sich die Kosten ohne Wärmerückgewinnung auf 13.676 €/t VOC (nur BK) bzw. 16.860 €/t VOC (BK + IK). Aufgrund der eingesparten Energie bei der Trocknung bei einer RNV mit Wärmerückgewinnung sinken die spezifischen VOC-Minderungskosten auf 8.473 €/t VOC (nur BK) bzw. 12.467 €/t VOC (BK + IK) und liegen unter den Kosten für die nasse Abluftreinigung.

Kostenverlauf über die Zeit

Um den Kostenverlauf über die Zeit zu veranschaulichen sind alle drei Varianten über eine Periode von 10 Jahren in Abbildung 9 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die laufenden Kosten im Vergleich zu den Investitionskosten eine größere Rolle spielen. Der Gesamtkostenunterschied zwischen den drei Varianten beträgt nach 10 Jahren 19 bzw. 15 Mio. €.

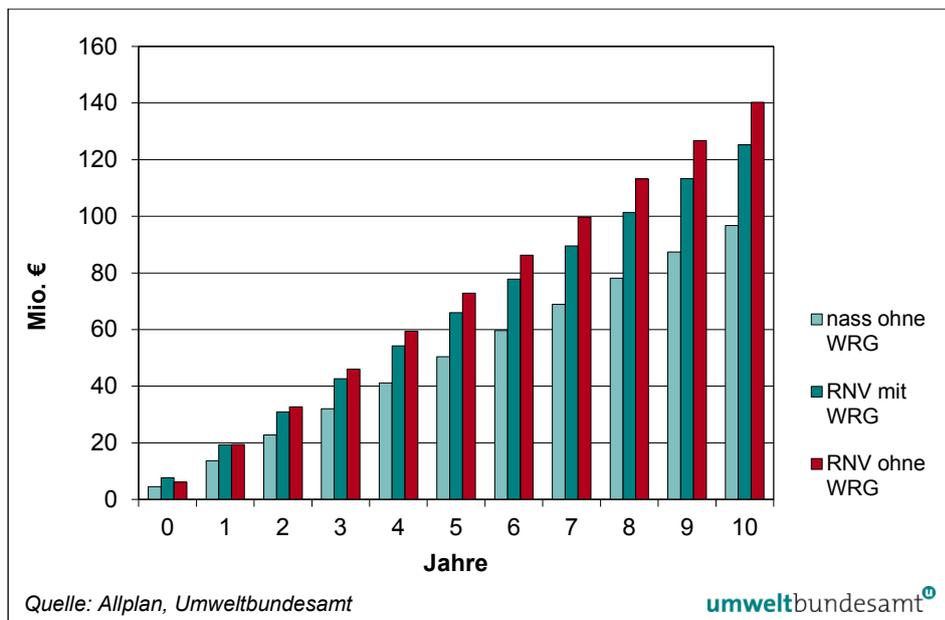
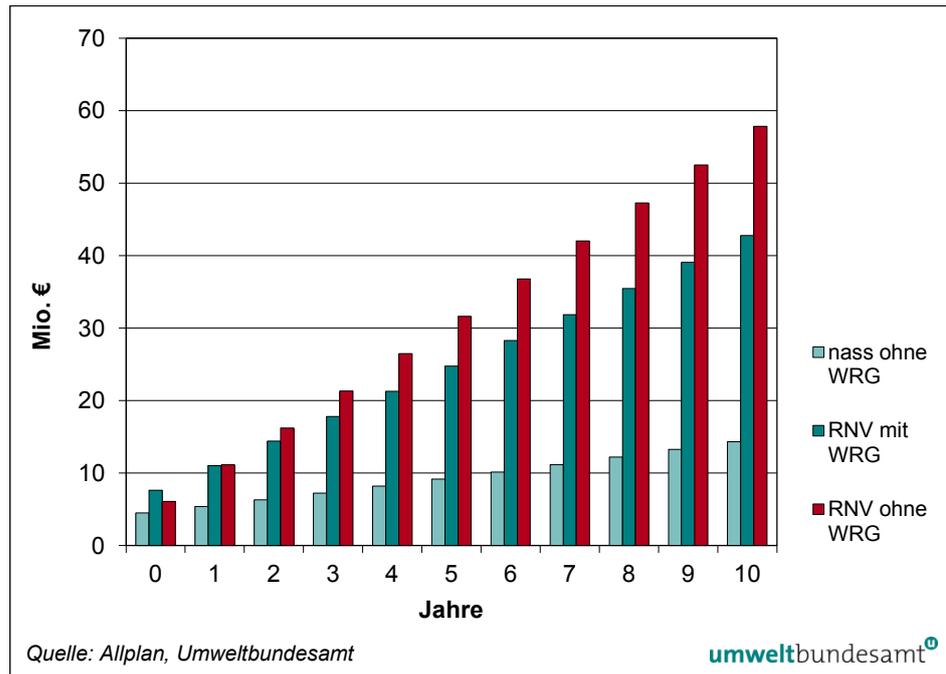


Abbildung 9:
Vergleich der Energie- und Investkosten für die Abluftreinigung und der Energiekosten für die Faser Trocknung bei der MDF-Produktion.

Da die laufenden Energiekosten für die Produktion ein großer Bestandteil sind, sind in Abbildung 10 die reinen Abluftreinigungskosten dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass die über 10 Jahre kumulierten Abluftreinigungskosten bei den RNV-Varianten deutlich über der nassen Abluftbehandlung liegen. Die über 10 Jahre kumulierten Betriebskosten der RNV sind ca. 3- bis 4-mal so hoch wie die Investitionskosten (Laufzeit 10 Jahre, 6 % Zinsen) von 13,7 Mio. € ohne Wärmerückgewinnung bzw. 10,9 Mio. € mit Wärmerückgewinnung. Bei der nassen Abluftreinigung liegen die Betriebskosten über 10 Jahre bei ca. 75 % der Investitionskosten (Laufzeit 10 Jahre, 6 % Zinsen) von 8,06 Mio. €.

Abbildung 10:
Vergleich der Energie-
und Investkosten MDF-
Abluftreinigung.



Nach 10 Jahren ergeben sich folgende Kostensummen für die Abluftreinigung:

Varianten	Mio. €
nass ohne WRG	14,35
RNV mit WRG	42,77
RNV ohne WRG	57,84

2.9.2 Spanplatte Modellanlage

Abluftvolumenstrom: 198.000 Nm³/h

Produktionsmenge: 460.000 m³/a

Tabelle 25: Kostenvergleich Spanplatte (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

	RNV ohne WRG	RNV mit WRG	nass	Einheit
Betriebskosten (BK) Energie				
thermische Energie	12.520.400	11.818.400	11.184.800	€/a
● Produktion	11.184.800	10.482.800	11.184.800	€/a
● Reinigung	1.335.600	1.335.600	0	€/a
elektrische Energie für Reinigung	612.000	648.532	360.000	€/a
Wartung*	500.000	500.000	50.000	€/a
Gesamt BK	13.632.400	12.966.932	11.594.800	€/a
Investitionskosten (IK)				
Abluftreinigung RNV	3.600.000	3.600.000		€
Abluftreinigung WESP			3.500.000	€
Wärmerückgewinnung	0	638.060	0	€
Gesamt IK	3.600.000	4.238.060	3.500.000	€
IK inkl. Zinsen/ Jahr	644.705	758.972	626.797	€/a
(10 Jahre, 6 % Zinsen)				
Spezifische Kennzahlen				
Betriebskosten (BK) Abluftreinigung	2.447.600	1.782.132**	410.000	€/a
Investitionskosten/Jahr (IK) Abluftreinigung	644.705	758.972	626.797	€/a
BK + IK Abluftreinigung	3.092.305	2.541.104	1.036.797	€/a
Produktionsmenge (PM)			460.000	m ³ /a
Produktpreis			150	€/m ³
BK Abluftreinigung pro PM	5,3	3,9	0,9	€/m ³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK)	3,5	2,6	0,6	€/m ³
BK + IK Abluftreinigung pro PM	6,7	5,5	2,3	€/m³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK + IK)	4,5	3,7	1,5	%

* In den Wartungskosten für die regenerative Nachverbrennung wurde ein regelmäßiger Füllkörpertauch miteinbezogen, um den Wärmerückgewinnungswirkungsgrad innerhalb der Anlagen bei 95 % zu halten. Außerdem wurden in den Wartungskosten berücksichtigt, dass bei einem Eingangsstaubgehalt 10 mg/Nm³ wiederkehrende Reinigungsarbeiten nötig sind.

** Die Kosteneinsparungen der Wärmerückgewinnung sind eigentlich Produktionskosteneinsparungen, da diese den Gaseinsatz des Trockners reduzieren; die Einsparungen wurden jedoch zur besseren Veranschaulichung gegen den Gaseinsatz in der RNV gerechnet.

Vorteil aus der Wärmerückgewinnung

Die jährlichen Kostensteigerungen gegenüber der nassen Abluftreinigung bei Installation einer RNV inkl. Wärmerückgewinnung sind bei der Spanplatte Modellanlage nur 85 % der Kostenerhöhung, wenn eine RNV ohne Wärmerückgewinnung implementiert werden würde (siehe auch Kapitel 2.8).

Kosten der Abgasreinigungsvarianten

Die Summe der jährlichen Betriebs- und Investitionskosten beträgt bei der nassen Abluftreinigung ca. 1,04 Mio. €. Demgegenüber beträgt die Summe bei der RNV mit Wärmerückgewinnung ca. 2,54 Mio. €, ohne Wärmerückgewinnung 3,09 Mio. €.

Tabelle 25 zeigt, dass die jährlichen Betriebskosten die jährlichen Investitionskosten (6 % Verzinsung, Laufzeit 10 Jahre) bei Einsatz der RNV ohne Wärmerückgewinnung im Gegensatz zur nassen Abluftreinigung übersteigen.

Bei einem angenommenen Produktpreis von 150 €/m³ und 460.000 m³ Produktion pro Jahr, ergeben sich spezifische Abluftreinigungskosten (Betriebs- und Investitionskosten) von 2,3 €/m³ bei Einsatz von Nasswäschern. Die Kosten steigen bei Emissionsminderung mittels RNV auf 5,5 €/m³ (mit WRG) bzw. 6,7 €/m³ (ohne WRG). Die Kostenanteile vom Produktpreis erhöhen sich bei der RNV mit WRG auf 3,7 % bzw. ohne WRG auf 4,5 % im Vergleich zu 1,5 % bei nasser Abluftreinigung.

Ausgehend von der Emissionsminderung mit Wäschern im Vergleich zur RNV mit WRG ist bei der Spanplatten-Modellanlage die Steigerung des Kostenanteils und der Kosten pro Produktionsmenge (1,5 % auf 3,7 % bzw. 2,3 €/m³ auf 5,5 €/m³) geringer als bei der MDF-Modellanlage (3,0 % auf 9,1 % bzw. 6,4 €/m³ auf 19,0 €/m³).

Anlagen, die in der Lage sind, einen Gewebefilter als Voreinigung für die regenerative Nachverbrennung einzusetzen, weisen mangels WESP einen geringeren Stromverbrauch auf. Im Vergleich zur WESP (0,5 MW elektrische Leistung) werden nur 0,2 MW elektrische Leistung benötigt, wodurch sich eine jährliche Betriebskostensenkung von 216.000 € ergibt.

Zusätzlich wird im Gewebefilter keine zusätzliche Feuchtigkeit in den Abluftvolumenstrom eingebracht. Dadurch verringert sich die absolute Wassermenge um 4 g pro kg Abluftvolumenstrom (trocken), die auch nicht in der RNV aufgeheizt werden muss. Mit einer spezifischen Wärmekapazität von 2,1 kJ/kgK ergibt sich dadurch eine zusätzliche Betriebskostenreduktion von ca. 150.000 € im Jahr.

Die Abluftreinigungskosten für die regenerative Nachverbrennung sinken somit im Vergleich zur Modellanlage mit WESP als Vorreinigungsstufe um ungefähr 366.000 €/a. Die spezifischen Reinigungskosten pro Kubikmeter Platte betragen in etwa bei der Nachverbrennung mit Wärmerückgewinnung 4,7 €/m³ Platte und ohne Wärmerückgewinnung 5,9 €/m³ Platte. Das entspricht einem Anteil am Produktpreis von 3,2 % (mit WRG) bzw. 3,9 % (ohne WRG).

Spezifische Kosten VOC-Minderung

Der VOC-Abscheidegrad bei nassarbeitenden Wäschern beträgt gemäß VDI Richtlinie 3462 Blatt 2 maximal 30 %. Bei einem Reingaswert von 150 mg/Nm³ ergibt sich eine Rohgaskonzentration von ca. 215 mg/Nm³. Nassarbeitende Wäscher scheiden bei einem Abgasvolumenstrom von 198.000 Nm³/h und 8.000 Betriebsstunden ca. 102 t/a ab. Bei der RNV beträgt der Anteil an geminderten VOC-Emissionen bei einem Abscheidegrad von ca. 98 % 334 t/a.

Die spezifischen VOC-Minderungskosten errechnen sich aus den absolut geminderten VOC-Mengen und den in Tabelle 25 dargestellten Betriebs- und Investitionskosten. Für die nasse Abluftreinigung der Trocknerabgase ergeben sich spezifische Kosten von 4.026 €/t VOC (nur BK) bzw. 10.182 €/t VOC (BK + IK).

Durch den Einsatz einer RNV würden sich die Kosten ohne Wärmerückgewinnung auf 7.313 €/t VOC (nur BK) bzw. 9.240 €/t VOC (BK + IK) erhöhen. Aufgrund der eingesparten Energie bei der Trocknung bei einer RNV mit Wärmerückgewinnung betragen die spezifischen VOC-Minderungskosten 5.325 €/t VOC (nur BK) bzw. 7.593 €/t VOC (BK + IK).

Im Vergleich zur MDF-Anlage sind bei der Spanplattenmodellanlage die spezifischen VOC-Minderungskosten bei Einsatz der RNV deutlich geringer. In beiden Fällen sinken die VOC-Minderungskosten (BK + IK) bei Verwendung der Nachverbrennung mit Wärmerückgewinnung im Vergleich zu den Nasswäschern.

Kostenverlauf über die Zeit

Der Gesamtkostenunterschied der RNV mit WRG bzw. RNV ohne WRG zum nassen System beträgt nach 10 Jahren 15,4 Mio. € bzw. 20,55 Mio. €.

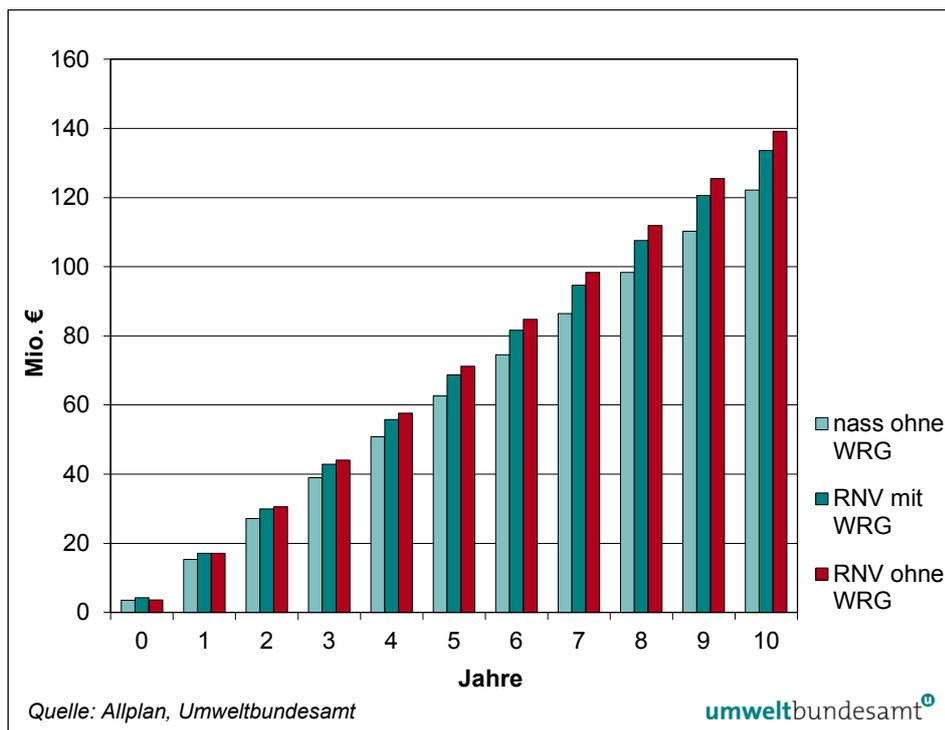


Abbildung 11:
Vergleich der Energie- und Investkosten für die Abluftreinigung und der Energiekosten für die Fasertrocknung bei der Spanplatten Produktion.

Es ist ersichtlich, dass die über 10 Jahre kumulierten Abluftreinigungskosten bei den RNV-Varianten deutlich über der nassen Abluftbehandlung liegen (siehe Abbildung 12).

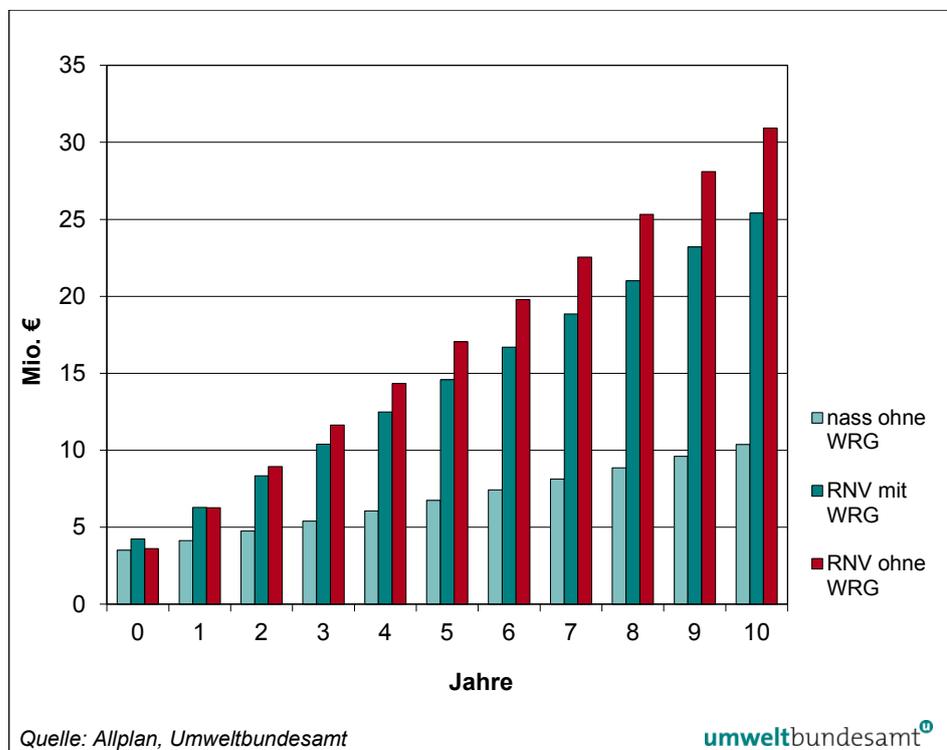
Die über 10 Jahre kumulierten Betriebskosten der RNV entsprechen den 2,3-fachen Investitionskosten von 7,58 Mio € (Laufzeit 10 Jahre, 6 % Zinsen) bei Installation einer Wärmerückgewinnung. Ohne Wärmerückgewinnung sind die über 10 Jahre summierten Betriebskosten ca. 3,8-mal höher als die Investi-

onskosten (Laufzeit 10 Jahre, 6 % Zinsen) von 6,45 Mio. €. Bei der nassen Abluftreinigung liegen die Betriebskosten über 10 Jahre bei ca. 65 % der Investitionskosten (Laufzeit 10 Jahre, 6 % Zinsen) von 6,27 Mio. €.

Ein Kostenvergleich der Abluftreinigungskosten (siehe Abbildung 12) zeigt, dass die Kosten der RNV ohne WRG ca. 300 % höher sind als bei einer nassen Abluftreinigung. Nach 10 Jahren ergeben sich folgende Kostensummen:

Varianten	Mio. €
nass ohne WRG	10,37
RNV mit WRG	25,41
RNV ohne WRG	30,92

Abbildung 12:
Vergleich der Energie- und Investkosten Spanplatten-Produktion – Abluftreinigung.



Die in Tabelle 26 dargestellten Zahlen berücksichtigen ausschließlich die Investitionskosten für die RNV ohne WESP. Diese Darstellung entspricht dem Fall einer Nachrüstung von bestehenden Anlagen mit einer Nachverbrennung zur Minderung der VOC-Emissionen.

Bei Neubau der gesamten Anlage und unter Berücksichtigung der Investitionskosten, sowohl der Vorreinigung (WESP) als auch der Hauptreinigung (RNV), erhöhen sich die Kosten der Abluftreinigung. Dies wird in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 26: Kostenvergleich Spanplatte – Neuanlage (IK WESP + RNV) (Quelle: Allplan, Umweltbundesamt).

	RNV ohne WRG	RNV mit WRG	nass ohne WRG	Einheit
Betriebskosten (BK) Energie				
thermische Energie	12.520.400	11.818.400	11.184.800	€/a
● Produktion	11.184.800	10.482.800	11.184.800	€/a
● Reinigung	1.335.600	1.335.600	0	€/a
elektrische Energie für Reinigung	612.000	648.532	360.000	€/a
Wartung*	500.000	500.000	50.000	€/a
Gesamt BK	13.632.400	12.966.932	11.594.800	€/a
Investitionskosten (IK)				
Abluftreinigung RNV	3.600.000	3.600.000		€
Abluftreinigung WESP	3.500.000	3.500.000	3.500.000	€
Wärmerückgewinnung	0	638.060	0	€
Gesamt IK	7.100.000	7.738.060	3.500.000	€
IK inkl. Zinsen/ Jahr	1.271.502	1.385.769	626.797	€/a
(10 Jahre, 6 % Zinsen)				
Spezifische Kennzahlen				
Betriebskosten (BK) Abluftreinigung	2.447.600	1.782.132**	410.000	€/a
Investitionskosten/Jahr (IK) Abluftreinigung	1.271.502	1.385.769	626.797	€/a
BK + IK Abluftreinigung	3.719.102	3.167.901	1.036.797	€/a
Produktionsmenge (PM)			460.000	m ³ /a
Produktpreis			150	€/m ³
BK Abluftreinigung pro PM	5,3	3,9	0,9	€/m ³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK)	3,5	2,6	0,6	%
BK + IK Abluftreinigung pro PM	8,1	6,9	2,3	€/m³
Kostenanteil Abluftreinigung (BK + IK)	5,4	4,6	1,5	%

* In den Wartungskosten für die regenerative Nachverbrennung wurde ein regelmäßiger Füllkörpertausch miteinbezogen, um den Wärmerückgewinnungswirkungsgrad innerhalb der Anlagen bei 95 % zu halten. Außerdem wurde in den Wartungskosten berücksichtigt, dass bei einem Eingangsstaubgehalt 10 mg/Nm³ wiederkehrende Reinigungsarbeiten nötig sind.

** Die Kosteneinsparungen der Wärmerückgewinnung sind eigentlich Produktionskosteneinsparungen, da diese den Gaseinsatz des Trockners reduzieren; die Einsparungen wurden jedoch zur besseren Veranschaulichung gegen den Gaseinsatz in der RNV gerechnet.

Kosten der Abgasreinigungsvarianten

Unter Berücksichtigung der Investitionskosten der RNV und der WESP erhöhen sich die Kosten der Abluftreinigung bei Einsatz einer Wärmerückgewinnung auf 3.167.901 und ohne Wärmerückgewinnung auf 3.719.102. Die spezifischen Kosten der Abluftreinigung betragen somit 6,9 €/m³ (RNV mit WRG) bzw. 8,1 €/m³ (RNV ohne WRG), was 4,6 % bzw. 5,4 % der Kosten des Produktpreises (150 €/m³ Spanplatte) entspricht.

Spezifische Kosten VOC-Minderung

Die spezifischen VOC-Minderungskosten betragen bei Berücksichtigung der Investitionskosten der RNV und der WESP 9.466 €/t VOC bei einer RNV mit Wärmerückgewinnung. Bei einer RNV ohne Wärmerückgewinnung erhöhen sich die spezifischen VOC-Minderungskosten auf 11.113 €/t VOC.

Kostenverlauf über die Zeit

Ein Kostenvergleich der Abluftreinigungskosten zeigt, dass die Kosten der RNV ohne WRG um ca. 350 % höher sind als bei einer nassen Abluftreinigung. Nach 10 Jahren ergeben sich folgende Kostensummen:

Varianten	Mio. €
nass ohne WRG	10,37
RNV mit WRG	31,68
RNV ohne WRG	37,19

Der Gesamtkostenunterschied der RNV mit WRG bzw. RNV ohne WRG zum nassen System beträgt nach 10 Jahren 21,3 Mio. € bzw. 26,82 Mio. €.

2.10 Kombination von VOC- und NO_x-Emissionsminderungs-technologien in anderen Branchen

Die Abluftvolumenströme von Drehrohröfen, die in der Zementbranche eingesetzt werden, sind mit denjenigen von Trocknern der Span- und Faserplattenherstellung von der Größenordnung her vergleichbar.

VOC-Emissionen entstehen unter anderem aus den organischen Komponenten in den Rohmaterialien im Wärmetauscher. NO_x wird aufgrund der Temperaturen im Brennprozess gebildet (thermisches NO_x). Zur Emissionsminderung von VOC und NO_x werden Sekundärtechnologien eingesetzt. Zudem müssen CO- und mitunter Geruchsemissionen gemindert werden.

2.10.1 Kombination RNV (RTO) mit SNCR

Die Emissionsminderung im Zementwerk Wopfung erfolgt beispielsweise durch Einsatz von Gewebefiltern sowie einer Kombination aus SNCR und regenerativer thermischer Oxidation (RTO, RNV) bei 900 °C. Bei dieser Nachverbrennung werden alle brennbaren Substanzen beseitigt und dadurch auch eine Geruchsminderung erzielt. Die zusätzlich zur Entstickung nach dem Drehrohröfen installierte Entstickungsstufe ist in die Brennkammer der Nachverbrennung integriert und sorgt für die Reduzierung von Stickstoffoxiden in der Abluft der Anlage (WOPFINGER 2013).

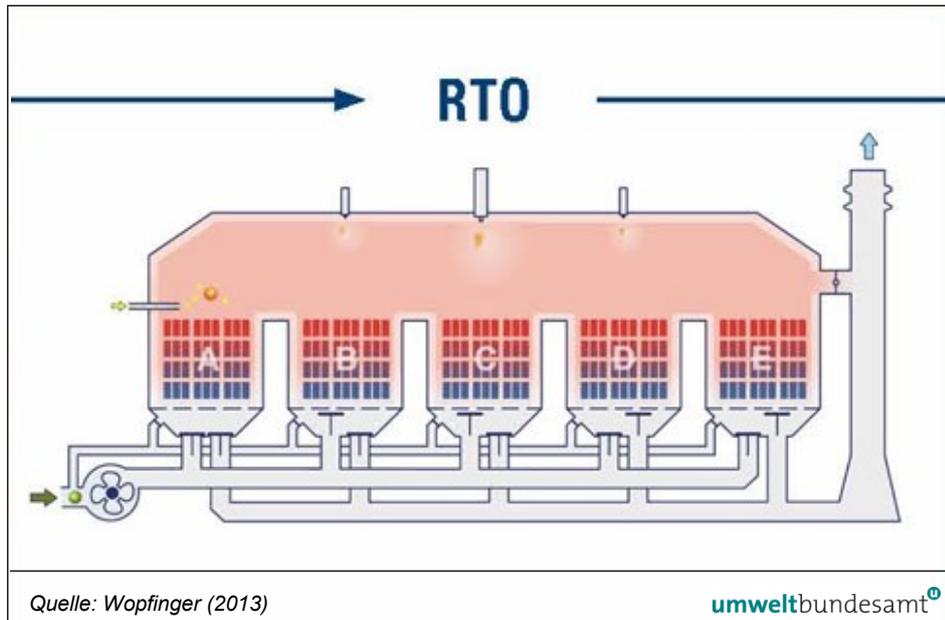


Abbildung 13:
Regenerative
thermische Oxidation im
Zementwerk Wopfinger
nach dem Drehrohrofen.

Die Anlage verfügt über eine Kapazität von 220.000 Nm³/h, die Errichtungskosten betragen insgesamt 9,5 Mio. € inklusive des neu errichteten Gewebefilters. Etwa 50 % der Kosten entfielen dabei auf die thermische Nachverbrennung.

Die Entwicklung der thermisch-regenerativen Nachverbrennungsanlage erfolgte gemeinsam mit dem Umwelttechnik-Unternehmen CTP. Das mehrstufige Verfahren wurde bereits zum Patent angemeldet.

Bei dieser Nachverbrennung werden alle brennbaren Substanzen beseitigt und dadurch auch eine Geruchsminderung erzielt.

2.10.2 Kombination RNV (RTO) mit SCR

Im Zementwerk Kirchdorf wurde eine Kombination von RTO und SCR in zwei Pilotanlagen getestet. Der Versuchsbetrieb ist abgeschlossen und die großtechnische Umsetzung im Winter 2013/14 geplant. Belastbare Ergebnisse werden für Ende 2015 erwartet.

Die RNV besteht aus 5 Kammern und die SCR ist in diesen integriert. Der Katalysator befindet sich dabei an der Stelle mit dem geeigneten Temperaturfenster (mittlere Lage bei ca. 350–400 °C).

3 LITERATURVERZEICHNIS

- DFIU-KARLSRUHE (2002): Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung Bericht über Beste Verfügbare Techniken (BVT) im Bereich der Lack- und Klebstoffverarbeitung in Deutschland; Anhang V: Prozessnachgeschaltete Maßnahmen zur Minderung von flüchtigen organischen Verbindungen digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/3243
- EASTIN, I. et al. (2012): UNECE/FAO: Forest Products Annual Market Review, 2011–2012; Wood-based panel markets, 2011–2012.
- MANTAU, U. (2012): Standorte der Holzwirtschaft, Holzrohstoffmonitoring, Holzwerkstoffindustrie – Kapazitätsentwicklung und Holzrohstoffnutzung im Jahr 2010. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft. Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft.
- UMWELTBUNDESAMT (2013): Svehla, J. & Winter, B.: Stand der Technik von Anlagen der Span- und Faserplattenindustrie. Beschreibung von Anlagen in Österreich und Luxemburg. Reports, Bd. Rep 0438. Umweltbundesamt, Wien.
- VDI (2012): VDI-Richtlinie 3462 Blatt 2, Entwurf: Emissionsminderung Holzbearbeitung und -verarbeitung Holzwerkstoffherstellung.
- WOPFINGER (2013):: Homepage des Unternehmens Wopfinger Baustoffindustrie GmbH im November 2013 http://www.wopfingerbaustoffe.at/front_content.php?idart=1181

4 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

€	.....	Euro
%	.....	Prozent
a	.....	Jahr
abs.	.....	absolut
atro	.....	absolut trocken
BK	.....	Betriebskosten
Bm ³	.....	Betriebskubikmeter
BWL	.....	Brennstoffwärmeleistung
°C	.....	Grad Celsius
COD	.....	chemical oxygen demand
cp	.....	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
CSB	.....	chemischer Sauerstoffbedarf
η	.....	Wirkungsgrad (eta)
EKBF	.....	Elektrokiesbettfilter
el.	.....	elektrisch
F	.....	Feuchte
f	.....	feucht
g	.....	Gramm
GWh	.....	Gigawattstunde
H	.....	spezifische Enthalpie
h	.....	Stunde
IK	.....	Investitionskosten
inkl.	.....	inklusive
K	.....	Kelvin
kg	.....	Kilogramm
kJ	.....	Kilojoule
kW	.....	Kilowatt
l	.....	Liter
m	.....	Meter
m ³	.....	Kubikmeter
MA	.....	Modellanlagen
MB	.....	Mehrbedarf
MDF	.....	mitteldichte Faserplatte
mg	.....	Milligramm

Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
n	Luftzahl
Nm ³	Normkubikmeter
NMVOG	non-methane volatile organic compounds
NV	Nachverbrennung
org. C	organischer Kohlenstoff
P	Leistung
Pa	Pascal
PM	Produktionsmenge
PP	Produktpreis
RL	Rücklauf
RNV	regenerative Nachverbrennung
RTO	regenerative thermal oxidizer (= RNV)
SCR	selective catalytic reduction
SNCR	selective non-catalytic reduction
t	Tonne
T	Temperatur
th	thermisch
TJ	Terajoule
tr	trocken
UTWS	Umluft, Teilluftstromverbrennung zur Organik und Geruchsreduzierung, Wärmerückgewinnung, Staubabscheidung (Verfahren zur Trocknung von Spänen)
V	Volumen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VL	Vorlauf
VOC	volatile organic compounds
WESP	wet electrostatic precipitator, Nasselektrofilter
WRG	Wärmerückgewinnung
x	Wassergehalt

5 ANHANG

Österreichische Luftschadstoffinventur

In Tabelle 27 ist die Gesamtmenge an NMVOC-Emissionen im Jahr 2011 nach der österreichischen Luftschadstoffinventur von 127.744 t/a dargestellt. Auf den Bereich Production Processes entfallen 5.323 t/a. Der Industriezweig Chipboard ist diesem Bereich zuzuordnen und es werden 744 t/a an NMVOC-Emissionen ausgewiesen. Zum Vergleich beträgt die Menge an emittierten NMVOC bei Production in Organic Chemical Industry 1.325 t/a.

Im Bereich Combustion in Manufacturing wurden 2011 1.540 t NMVOC ausgestoßen. Die Industriezweige Cement sowie Pulp, Paper and Prints emittierten in diesem Bereich im Jahr 2011 236 t/a bzw. 253 t/a.

NMVOC 2011 (in t/a)	Total without sinks	Production Pro- cesses	Combustion in Manufacturing
Total	127.744	5.323	1.540
davon Chipboard		744	
davon Cement			236
davon Pulp, Paper and Prints			253
davon Production in Organic Chemical Industry		1.325	

Tabelle 27:
Mengen an emittierten
NMVOC im Jahr 2011
nach der
österreichischen
Luftschadstoffinventur
(Quelle:
Umweltbundesamt).

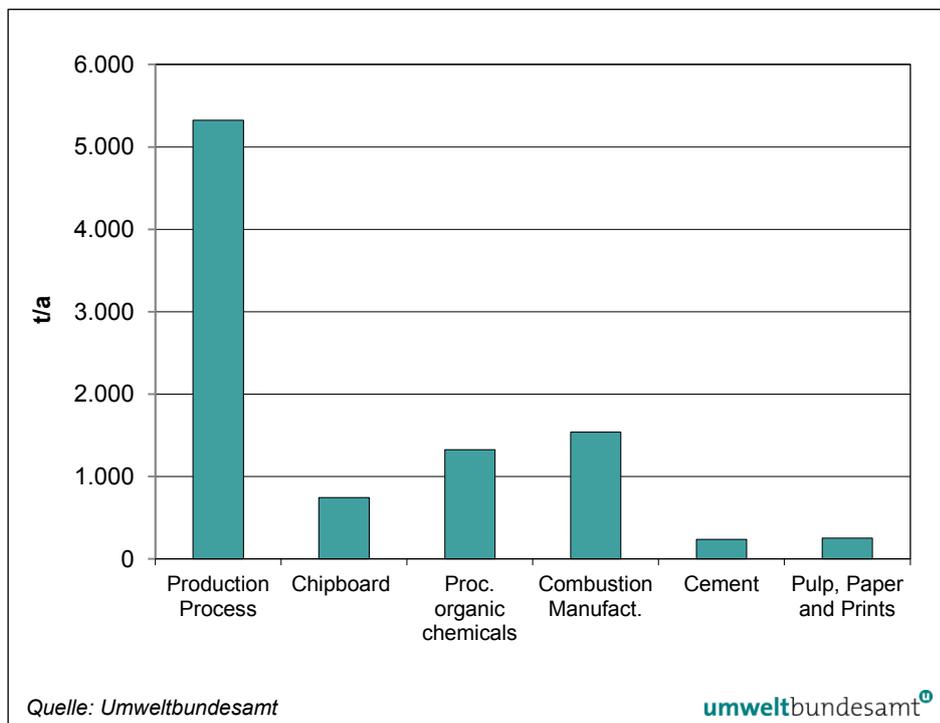


Abbildung 14:
NMVOC-Emissionen für
die Bereiche Production
Process mit den zu-
gehörigen Industrie-
zweigen Chipboard und
Processing Organic
Chemicals und der
Bereich Combustion in
Manufacturing mit den
Industriezweigen
Cement und Pulp, Paper
and Prints.

Die emittierten Mengen an NMVOC im Spanplattenbereich stellen laut der österreichischen Luftschadstoffinventur ca. 14 % im Bereich Production Processes dar. Des Weiteren ist die Menge fast dreifach so hoch wie jene bei der Zementherstellung oder in der Papier und Zellstoffindustrie.

In der Abbildung 14 sind die Relationen des Industriezweiges Chipboard zu den erwähnten Sektoren grafisch dargestellt.

Verhältnisse Produktionsvolumina zu Abluftvolumenstrom europäischer MDF Anlagen

Das Umweltbundesamt hat die Verhältnisse aus Produktionsvolumina zu Abluftvolumenstrom europäischer MDF Anlagen aus den Daten von REP-0438 (UMWELTBUNDESAMT 2013), den BAT-Fragebögen und MANTAU, U. (2010) berechnet.

Anlagen	Produktion	Abluftvolumenstrom	Verhältnis
	m ³ /y	Nm ³ /h	
Egger Brilon * GER	240.000	246.000	1,03
Sonae Glunz Meppen * GER	190.000	264.451	1,39
Egger Wismar * GER	445.000	598.600	1,35
Sonae Glunz AG GER	293.980	350.000	1,19
Pfleiderer * GER	361.900	651.100	1,80
Kronospan Ltd. UK	216.460	394.587	1,82
Kronospan Ltd. UK	448.658	732.245	1,63
Sonae Indústria POR	200.000	392.380	1,96
MDF Linie Kaindl **	400.000	800.000	2,00
MDF Hallein	300.000	320.000	1,07

*Tabelle 28:
Verhältnis der
Produktionsvolumina
und der mittleren
Abluftvolumenströme)
europäischer MDF-
Werke (Quelle:
Umweltbundesamt).*

* Die Angaben zur Produktion entsprechen den Produktionskapazitäten

** Maximaler zeitweise erreichter Abluftvolumenstrom

Tabelle 29: Energie- und Massenbilanz MDF RNV (Quelle: Allplan).

Gruppe	Bezeichnung	Vol.str trocken	Vol.str. Feucht	Dichte feucht	Mass str. trocken	Mass str. Feucht	Temp	Feuchte abs	Feuchte rel	Feuchte Beladung	Feuchte Beladung	Enthalpie feucht	Leistung trocken	Leistung feucht
		Nm ³ /h	Bm ³ /h	kg/m ³	kg/h	kg/h	°C	kg/h	%	g/kg tr	g/Nm tr	kJ/kg	kW	kW
Kessel	Holz Einsatz				8.000,0	11.428,6		3.428,6	30%			18,0	40.000,0	
vor Eintritt	Zuluft	89.239,7			113.780,6	114.395,0	10	614,4						
	Kontrolle - Verbrennung	89.239,7			113.780,6		1.090	614,4					37.895,3	
nach Austritt	Massenstrom inkl asche					125.823,6								
	Rauchgas	90.579,9	200.728,0	0,595	115.489,4	119.532,4	300	4043,0	3,38%	35,01	44,6	413,8	10.105,3	13.274,9
Beileimung	Zuluft	380.000,0	397.289,0	1,226	484.500,0	487.116,3	10	2.616,3	70%	5,40	6,9	23,65	1.345,8	3.182,9
	Holzfasern (100% Feuchte)	28,1		600	16.875,0	33.750,0	10	16.875,0	50%			29,50	79,7	276,6
vor Trockner	Mischluft	470.579,9	741.921,0	0,818	599.989,4	606.648,7	150	6.659,3	0,367%	11,10	14,2	182,49	25.749,5	30.414,1
												Kontrolle	11.451,2	16.457,8
Trocknerfeuerung	Gas	1.412,7		0,750	1.059,6	1.059,6							14.298,4	13.956,4
	O2				4.238,2	4.238,2								
	CO2				2.913,8	2.913,8								
	2 H2O					2.384,0		2.384,0						
nach Trockner	Mischluft (ohne Faser)	471.992,7	627.000,0	0,99	598.665,0	624.583,3	68,1	25.918,3	22,8%	43,29	55,2	182,5	11.497,7	30.347,0
	Verd. Enthalpie							25.918,3				2257		16.249,3
	Holzfasern (7% Feuchte)				16.875,0	18.056,3	41,9	1.181,3					333,9	1.103,3
WESP	Wassereinspritzung		589.545,0		598.665,0	631.359,3	41,97	6.776,0	99%	54,65		183,1		30.448,8
RNV	benötigte Leistung ohne WT	471.992,7			598.665,0	631.359,3	800	32.694,3					135.458,7	149.915,6
	Leistungsanteil Feuchte	10,7%												
	tatsächlich benötigte Leistung	749,6		0,750	562,2	562,2								7.495,8
	O2				2.248,7	2.248,7								
	CO2				1.546,0	1.546,0								
	2H2O					1.264,9		1.264,9						
	Kaminabgas	472.742,2	648.646,0	1,04	597.962,2	631.921,4	78,3	33.959,2	19,0%	56,79		228,4	13.240,8	37.944,5
WRG	Wärmerückgewinnung													5.350,0
	Kaminabgas nach WRG	472.742,2			597.962,2	631.921,4	49,0	33.959,2	71,5%	56,79		196,2	8.286,1	32.594,5

Tabelle 31: Energie- und Massenbilanz Spanplatte – RNV Reinigung (Quelle: Allplan).

Gruppe	Bezeichnung	Vol.str	Vol.str.	Dichte	Mass str.	Mass str.	Temp	Feuchte	Feuchte	Feuchte	Feuchte	Enthalpie	Leistung	Leistung
		trocken	Feucht	feucht	trocken	Feucht		abs	rel	Beladung	Beladung				feucht	trocken	feucht
		Nm³/h	Bm³/h	kg/m³	kg/h	kg/h	°C	kg/h	%	g/kg tr	g/Nm tr	kJ/kg	kW	kW
Kessel	Holz Einsatz				8.000,0	11.428,6		3.428,6	30%			18,0	40.000,0	
vor Eintritt	Zuluft	89.239,7			113.780,6	114.395,0	10	614,4						
	Kontrolle - Verbrennung	89.239,7			113.780,6		1.090	614,4					37.895,3	
nach Austritt	Massenstrom inkl asche					125.823,6								
	Rauchgas	90.579,9	200.728,0	0,595	115.489,4	119.532,4	300	4043,0	3,38%	35,0	44,6	413,8	10105,3	13274,9
Beleimung	Zuluft	105.000,0	99.322,0	1,226	133.875,0	134.597,9	10	722,9	70%	5,4	6,9	23,65	371,9	879,5
	Holzfaser (100% Feuchte)	33,3		600	20.000,0	40.000,0	10	20.000,0	50%			29,50	94,4	327,8
vor Trockner	Mischluft	195.579,9	420.000,0	0,600	249.364,4	254.130,3	300	4.765,9	0,035%	19,1	24,4	364,8	21403,8	25268,9
												Kontrolle	10477,2	14154,4
Trocknerfeuerung	Gas benötigte Leistung - 300°C	1111,5		0,750	833,6	833,6							10926,6	11114,6
	O2				3.334,4	3.334,4								
	CO2				2.292,4	2.292,4								
	2H2O					1.875,6		1.875,6						
	Mischluft mit Faser/Gas				270.198,0	294.963,9	300	24.765,9				364,8		29889,7
nach Trockner	Mischluft (ohne Faser)	196.691,4	295.500,0		248.322,4	274.963,9	80,3	26.641,5	30,9%	107,3	136,8	366,3	5649,8	25268,9
	Verd. Enthalpie							26.641,5				2257		16702,7
	Holzfaser (7% Feuchte)				20.000,0	20.400,0	80	400,0					755,6	1025,0
WESP	Wassereinspritzung				248.322,4	277.863,9	55,8	29.541,5	99%	119,0		367,0		25315,1
RNV	benötigte Leistung ohne WT	196.691,4			248.322,4	277.863,9	800	29.541,5					55419,2	68243,7
	Leistungsanteil Feuchte	23,1%												
	tatsächlich benötigte Leistung	341,2		0,750	255,9	255,9							2770,96	3412,2
	O2				1.023,7	1.023,7								641,2
	CO2				703,8	703,8								
	2H2O					575,8		575,8						
	Kaminabgas	197.032,6	295.732	0,899	248.002,5	278.119,8	96,1	30.117,3	18,3%	121,4		416,3	8420,72	28681,11
WRG	Wärmerückgewinnung													1.950,0
	Kaminabgas nach WRG	197.032,6			248.002,5	278.119,8	68,3	30.117,3	56,6%	121,4		388,0	4.813,8	26.731,1

Tabelle 32: Energie- und Massenbilanz Spanplatte – nasse Reinigung (Quelle: Allplan).

Gruppe	Bezeichnung	Vol.str trocken	Vol.str. Feucht	Dichte feucht	Mass str. trocken	Mass str. Feucht	Temp	Feuchte abs	Feuchte rel	Feuchte Beladung	Feuchte Beladung	Enthalpie feucht	Leistung trocken	Leistung feucht
		Nm ³ /h	Bm ³ /h	kg/m ³	kg/h	kg/h	°C	kg/h	%	g/kg tr	g/Nm tr	kJ/kg	kW	kW
Kessel	Holz Einsatz				8.000,0	11.428,6		3.428,6	30%			18,0	40.000,0	
vor Eintritt	Zuluft	89.239,7			113.780,6	114.395,0	10	614,4						
	Kontrolle - Verbrennung	89.239,7			113.780,6		1.090	614,4					37.895,3	
nach Austritt	Massenstrom inkl asche					125.823,6								
	Rauchgas	90.579,9	200.728,0	0,595	115.489,4	119.532,4	300	4043,0	3,38%	35,0	44,6	413,8	10105,3	13274,9
Beleimung	Zuluft	105.000,0	99.322,0	1,226	133.875,0	134.597,9	10	722,9	70%	5,4	6,9	23,65	371,9	879,5
	Holzfaser (100% Feuchte)	33,3		600	20.000,0	40.000,0	10	20.000,0	50%			29,50	94,4	327,8
vor Trockner	Mischluft	195.579,9	420.000,0	0,600	249.364,4	254.130,3	300	4.765,9	0,035%	19,1	24,4	364,8	21403,8	25268,9
	Kontrolle												10477,2	14154,4
Trocknerfeuerung	Gas benötigte Leistung - 300°C	1111,5		0,750	833,6	833,6							10926,6	11114,6
	O2				3.334,4	3.334,4								
	CO2				2.292,4	2.292,4								
	2H2O					1.875,6		1.875,6						
	Mischluft mit Faser/Gas				270.198,0	294.963,9	300	24.765,9				364,8		29889,7
nach Trockner	Mischluft (ohne Faser)	196.691,4	295.500,0		248.322,4	274.963,9	80,3	26.641,5	30,9%	107,3	136,8	366,3	5649,8	25268,9
	Verd. Enthalpie							26.641,5				2257		16702,7
	Holzfaser (7% Feuchte)				20.000,0	20.400,0	80	400,0					755,6	1025,0
WESP / Wäscher	Wassereinspritzung				248.322,4	277.863,9	55,8	29.541,5	99%	119,0		367,0		25315,1
	Vorgabe				Stöchiometrie Gasverbrennung									
	iterativ				ch4	2o2	co2	2 h2o						
	gewählt				kg	1,0	4,0	2,75	2,25					
	Berechnungsprogramme				mol	16	64	44	36					

Tabelle 33: Werte zu Luft, Holz, Verbrennung; Legende (Quelle: Allplan).

Luft			kJ/kgK	
	cp Luft	400 °C	1,07	
		300 °C	1,05	
		200 °C	1,03	
		120 °C	1,01	
	Umgebungsluft	dichte N	1,275	kg/m ³
		AT	0	°C
		Feuchte rel	70 %	
		Feuchte abs	5,4	g/kg
		Enthalpie	23,65	kJ/kg
Rauchgas	O ₂ Rauchgas	11 %		
	n	2,1		
	Aschegehalt	5 %		
	Hu Holz tr	5	kWh/kg	
Holz	Faserfeuchte	100 %		
	Gewicht tr	50 %		
	Faserrestfeuchte	2 %		
	cp Holz	1,7	kJ/kgK	
	Atro	Wassergehalt		
	90 %	47 %		
	10 %	5 %		
Wasser	cp Wasser	4,2	kJ/kgK	
	cp Dampf	2,1	kJ/kgK	
Erdgas	Erdgas Dichte	0,75	kg/m ³	

Tabelle 34 Investitionskostenschätzung – RNV, nass (Quelle: Allplan).

	nass	MDF Modell	Span Modell
Bm³/h	500.000	600.000	300.000
Bezeichnung	Kosten (in €)		
RTO CTP	3.750.000	4.500.000	2.587.500
Installation (Kanäle, Klappen etc.)	200.000	240.000	180.000
Regelung (2 %)	79.000	94.800	59.250
Planung (5 %)	201.450	241.740	141.338
Unvorhersehbares (5 %)	211.523	253.827	148.404
GU (12,5 %)	555.247	666.296	389.561
Inbetriebnahme (2 %)	99.944	119.933	70.121
Gesamtinvestitionen RNV	5.097.163,4	6.116.596,1	3.576.174,4
Wartung	100.000	1.175.000	500.000
Investition Nasse Abluftreinigung		4.500.000	

Tabelle 35: Investitionskostenschätzung – Wärmerückgewinnung (Quelle: Allplan).

Investition – Wärmerückgewinnung		
	Spanplatte	MDF
Abluft/Wasser – Edelstahl	207.000	705.720
Luft/Wasser	39.000	130.950
Wasserrohrleitung DN125/DN175 (isoliert, verlegt)	140.000	196.000
Wasser Umwälzpumpe	3.000	6.000
Ventile, Armaturen, Wasserseite	5.000	8.000
Luftkanalanpassung	20.000	40.000
Bypass	40.000	80.000
Armaturen, Klappen	20.000	40.000
MSR	10.000	10.000
Installation (WT)	50.000	75.000
Planung (2 %)	9.680	24.333
Unvorher (5 %)	24.200	60.834
GU (12,5 %)	60.500	152.084
Inbetriebnahme (2 %)	9.680	24.333
Summe	638.060	1.553.254

Tabelle 36: MDF-Kostenübersicht dynamisch (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	7,65	6,10	4,50	0,00	0,00	0,00	4,50	7,65	6,10
1	106,0 %	8,11	6,47	4,77	11,15	12,93	8,87	13,64	19,26	19,40
2	112,4 %	8,60	6,85	5,06	22,31	25,86	17,74	22,79	30,90	32,72
3	119,1 %	9,11	7,27	5,36	33,46	38,80	26,61	31,97	42,57	46,06
4	126,2 %	9,66	7,70	5,68	44,62	51,73	35,48	41,16	54,27	59,43
5	133,8 %	10,24	8,16	6,02	55,77	64,66	44,34	50,37	66,01	72,82
6	141,9 %	10,85	8,65	6,38	66,92	77,59	53,21	59,60	77,78	86,24
7	150,4 %	11,50	9,17	6,77	78,08	90,52	62,08	68,85	89,58	99,70
8	159,4 %	12,19	9,72	7,17	89,23	103,45	70,95	78,12	101,42	113,18
9	168,9 %	12,92	10,31	7,60	100,39	116,39	79,82	87,42	113,31	126,69
10	179,1 %	13,70	10,92	8,06	111,54	129,32	88,69	96,75	125,24	140,24

Tabelle 37: MDF-Kostenübersicht dynamisch, Abluftreinigung (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	7,65	6,10	4,50	0,00	0,00	0,00	4,50	7,65	6,10
1	106,0 %	8,11	6,47	4,77	2,91	4,69	0,63	5,40	11,02	11,16
2	112,4 %	8,60	6,85	5,06	5,81	9,38	1,26	6,31	14,41	16,24
3	119,1 %	9,11	7,27	5,36	8,72	14,08	1,89	7,25	17,83	21,34
4	126,2 %	9,66	7,70	5,68	11,63	18,77	2,52	8,20	21,29	26,47
5	133,8 %	10,24	8,16	6,02	14,54	23,46	3,14	9,17	24,77	31,62
6	141,9 %	10,85	8,65	6,38	17,44	28,15	3,77	10,16	28,30	36,80
7	150,4 %	11,50	9,17	6,77	20,35	32,84	4,40	11,17	31,85	42,02
8	159,4 %	12,19	9,72	7,17	23,26	37,53	5,03	12,20	35,45	47,26
9	168,9 %	12,92	10,31	7,60	26,17	42,23	5,66	13,26	39,09	52,53
10	179,1 %	13,70	10,92	8,06	29,07	46,92	6,29	14,35	42,77	57,84

Tabelle 38: Spanplatte Kostenübersicht dynamisch (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	4,24	3,60	3,50	0,00	0,00	0,00	3,50	4,24	3,60
1	106,0 %	4,49	3,82	3,71	12,61	13,27	11,59	15,30	17,10	17,09
2	112,4 %	4,76	4,04	3,93	25,21	26,54	23,19	27,12	29,98	30,59
3	119,1 %	5,05	4,29	4,17	37,82	39,82	34,78	38,95	42,87	44,10
4	126,2 %	5,35	4,54	4,42	50,43	53,09	46,38	50,80	55,78	57,63
5	133,8 %	5,67	4,82	4,68	63,03	66,36	57,97	62,66	68,71	71,18
6	141,9 %	6,01	5,11	4,96	75,64	79,63	69,57	74,53	81,65	84,74
7	150,4 %	6,37	5,41	5,26	88,25	92,91	81,16	86,43	94,62	98,32
8	159,4 %	6,75	5,74	5,58	100,86	106,18	92,76	98,34	107,61	111,92
9	168,9 %	7,16	6,08	5,91	113,46	119,45	104,35	110,27	120,62	125,53
10	179,1 %	7,59	6,45	6,27	126,07	132,72	115,95	122,22	133,66	139,17

Tabelle 39: Spanplatte Kostenübersicht dynamisch, Abluftreinigung (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	4,24	3,60	3,50	0,00	0,00	0,00	3,50	4,24	3,60
1	106,0 %	4,49	3,82	3,71	1,78	2,45	0,41	4,12	6,27	6,26
2	112,4 %	4,76	4,04	3,93	3,56	4,90	0,82	4,75	8,33	8,94
3	119,1 %	5,05	4,29	4,17	5,35	7,34	1,23	5,40	10,39	11,63
4	126,2 %	5,35	4,54	4,42	7,13	9,79	1,64	6,06	12,48	14,34
5	133,8 %	5,67	4,82	4,68	8,91	12,24	2,05	6,73	14,58	17,06
6	141,9 %	6,01	5,11	4,96	10,69	14,69	2,46	7,42	16,70	19,79
7	150,4 %	6,37	5,41	5,26	12,47	17,13	2,87	8,13	18,85	22,55
8	159,4 %	6,75	5,74	5,58	14,26	19,58	3,28	8,86	21,01	25,32
9	168,9 %	7,16	6,08	5,91	16,04	22,03	3,69	9,60	23,20	28,11
10	179,1 %	7,59	6,45	6,27	17,82	24,48	4,10	10,37	25,41	30,92

Tabelle 40: Spanplatte Kostenübersicht dynamisch – Neuanlage (IK WESP + RNV) (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	7,74	7,10	3,50	0,00	0,00	0,00	3,50	7,74	7,10
1	106,0 %	8,20	7,53	3,71	1,67	2,34	0,41	4,12	9,87	9,87
2	112,4 %	8,69	7,98	3,93	3,34	4,68	0,82	4,75	12,04	12,66
3	119,1 %	9,22	8,46	4,17	5,01	7,02	1,23	5,40	14,23	15,48
4	126,2 %	9,77	8,96	4,42	6,68	9,36	1,64	6,06	16,45	18,32
5	133,8 %	10,36	9,50	4,68	8,35	11,70	2,05	6,73	18,71	21,20
6	141,9 %	10,98	10,07	4,96	10,02	14,04	2,46	7,42	21,00	24,11
7	150,4 %	11,64	10,68	5,26	11,69	16,38	2,87	8,13	23,33	27,05
8	159,4 %	12,33	11,32	5,58	13,36	18,72	3,28	8,86	25,70	30,03
9	168,9 %	13,07	12,00	5,91	15,03	21,06	3,69	9,60	28,11	33,05
10	179,1 %	13,86	12,72	6,27	16,71	23,40	4,10	10,37	30,56	36,11

Tabelle 41: Spanplatte Kostenübersicht dynamisch, Abluftreinigung – Neuanlage (IK WESP + RNV) (Quelle: Allplan).

Jahr	Gesamt-Zins	Invest			Betrieb			Gesamt		
		RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG	nass ohne WRG	nass ohne WRG	RNV mit WRG	RNV ohne WRG
0	100,0 %	7,74	7,10	3,50	0,00	0,00	0,00	3,50	7,74	7,10
1	106,0 %	8,20	7,53	3,71	1,67	2,34	0,41	4,12	9,87	9,87
2	112,4 %	8,69	7,98	3,93	3,34	4,68	0,82	4,75	12,04	12,66
3	119,1 %	9,22	8,46	4,17	5,01	7,02	1,23	5,40	14,23	15,48
4	126,2 %	9,77	8,96	4,42	6,68	9,36	1,64	6,06	16,45	18,32
5	133,8 %	10,36	9,50	4,68	8,35	11,70	2,05	6,73	18,71	21,20
6	141,9 %	10,98	10,07	4,96	10,02	14,04	2,46	7,42	21,00	24,11
7	150,4 %	11,64	10,68	5,26	11,69	16,38	2,87	8,13	23,33	27,05
8	159,4 %	12,33	11,32	5,58	13,36	18,72	3,28	8,86	25,70	30,03
9	168,9 %	13,07	12,00	5,91	15,03	21,06	3,69	9,60	28,11	33,05
10	179,1 %	13,86	12,72	6,27	16,71	23,40	4,10	10,37	30,56	36,11

Umweltbundesamt GmbH

Spittelauer Lände 5
1090 Wien/Österreich

Tel.: +43-(0)1-313 04

Fax: +43-(0)1-313 04/5400

office@umweltbundesamt.at

www.umweltbundesamt.at

Die Studie ergänzt den Report des Umweltbundesamtes zum Stand der Technik zur Span- und Faserplattenindustrie (REP-0438) um Energiebilanzen sowie Abluftreinigungskosten für die Spanplatten- und MDF-Herstellung.

Auf Basis der Energiebilanzen für zwei standardisierte Modellanlagen werden die Abluftreinigungssysteme regenerative Nachverbrennung (RNV; mit und ohne Wärmerückgewinnung) und (Bio-)Wäscher für die Spanplatten- und MDF-Herstellung verglichen. Dafür wurden der jeweilige Energiebedarf sowie die Emissionen von flüchtigen organischen Kohlenstoffverbindungen (VOC), Stickstoffoxiden (NO_x) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) herangezogen.

Zusätzlich enthält die Studie die Betriebs- und Investitionskosten der beiden Abluftreinigungssysteme, die in Relation zum Produktpreis gesetzt werden. Die spezifischen VOC-Minderungskosten werden ebenso berechnet.