

Bericht Nr. 44.078

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

# Entwicklung eines neuen Konzepts zur hoch energieeffizienten, zentralen Brennluftversorgung für In- dustrieöfen [BreLuVent]

von

A.Tacke, W. Adler, BFI

und

Marc Velten, Torsten Hoeveler, J&H Gebläsetechnik  
GmbH

Abschlussbericht

DBU-Aktenzeichen: 31898/01-24/0

Düsseldorf, Oktober 2019



VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
GmbH

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

**Entwicklung eines neuen Konzepts  
zur hoch energieeffizienten,  
zentralen Brennluftversorgung für Industrieöfen  
[BreLuVent]**

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,  
gefördert unter dem  
Az: 31898/01-24/0  
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von: Andreas Tacke, Wolfgang Adler, BFI  
und  
Marc Velten, Torsten Hoeveler, J&H Gebläsetechnik GmbH

Oktober 2019

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>31898/01-24/0</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>99.670 €</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung eines neuen Konzepts zur hoch energieeffizienten, zentralen Brennluftversorgung für Industrieöfen [BreLuVent]</b>				
<b>Stichworte</b>	Energie, Verbrennung				
	Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
	<b>19 Monate</b>	<b>01.08.2017</b>	<b>28.02.2019</b>	<b>1</b>	
	Zwischenberichte				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH Sohnstraße 65 40237 Düsseldorf			Tel	0211-6707 257
				Fax	0211-6707 202
				Projektleitung	
				Dipl.-Ing. Andreas. Tacke	
				Bearbeiter	
				Dipl.-Ing. Andreas. Tacke	
<b>Kooperationspartner</b>	J&H Gebläsetechnik GmbH Windhukstraße 93 42277 Wuppertal				

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Wärm- und Wärmebehandlungsprozesse der Stahlindustrie werden häufig in Chargenöfen durchgeführt, die in einem weiten Leistungsbereich geregelt werden. Jeder Ofen hat lokale Brennluftgebläse. In der Regel sind dies Radialgebläse. Radialgebläse werden aufgrund ihres Regelverhaltens durchgehend im Vollastbetrieb gefahren. Luftüberschüsse werden entweder abgeblasen oder weggedrosselt. Dabei ändert sich jedoch der Vordruck am Einzelbrenner und damit die Leistung. Dies gilt es zu verhindern.

Ziel im Vorhaben ist es, den Öfen zugeordnete lokale Gebläse durch eine zentrale Gebläsegruppe zu ersetzen. Radialgebläse können dabei im Nennbetrieb als Grundgebläse mit konstantem Druck betrieben werden. Geregelt wird der Luftvolumenstrom durch Zu- und Abschalten von Gebläsen sowie durch ein zusätzliches Drehkolbengebläse als Regelgebläse für die Feinregelung. Der Vordruck an den Einzelbrennern der Öfen bleibt konstant und damit auch deren Leistung. Das verbundene Brennluftnetz gleicht Druckstöße aus. Instandsetzung, Austausch und Wartung eines Gebläses sind möglich, ohne dass ein direkt zugeordneter Ofen dabei abgeschaltet werden muss. Frischluftansaugung vermindert das Zusetzen der Filter. Die Eliminierung der Radialgebläse aus der Produktionshalle führt zu einer Emissionsreduzierung von Lärm in der Produktionshalle und verbessert die Arbeitsbedingungen.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Anhand einer ausgewählten existierenden Ofengruppe wurde der Istzustand der Brennluftversorgung durch Aufnahme von Betriebsmessdaten sowie einer Datenanalyse charakterisiert. Basierend auf der vorhandenen Datenbasis wurde ein analytisches Modell für das zeitabhängige Verhalten von Volumstrom, Druck und Wirkungsgrad erstellt. Mit Hilfe dieses Modells können typische und kritische Betriebs-situationen der Brennluftversorgung einer Ofengruppe dargestellt werden. Unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien wurde das Konzept einer zentralen Gebläseeinheit mit einer bedarfsgerechten Teillastregelung entwickelt. Die Verifizierung dieses Konzepts erfolgte in einem, für das Forschungsprojekt konzipierten Gebläseprüfstand. Die neu entwickelte zentrale Brennluftversorgung wurde in einem eindimensionalen numerischen Modell abgebildet. Diese Vorgehensweise mindert das Entwicklungsrisiko erheblich, da gasdynamische Effekte (z.B. Druckverluste im Rohrleitungssystem) damit ohne aufwendigen anlagentechnischen Aufwand untersucht werden können. In einem weiteren Arbeitsschritt wurden prozess- und betriebstechnische Vor- und Nachteile dargestellt und Wirtschaftlichkeitsdiskussion durchgeführt.

## **Ergebnisse und Diskussion**

In der Schmiedehalle eines mittelständischen Wärmebehandlungsbetriebes wurde eine Gruppe bestehend aus 4 Schmiedeöfen ausgewählt. Die für die Modellerstellung, Simulation und Ergebnisverifizierung erforderliche Datenbasis wurde für einen Zeitraum von einer Woche abgefragt. Außerdem wurden nicht vorhandene Daten durch Betriebsmessungen ermittelt. Im Ergebnis der Datenauswertung wurde festgestellt, dass der maximale Volllast-Brennluftvolumenstrom bei 2 Öfen zu keinem Zeitpunkt und bei den anderen 2 Öfen zu weniger als 10% der Betriebszeit abgerufen wird. Da die Brennluftgebläse (Radialgebläse) aufgrund ihres Regelverhaltens (Kennlinien) permanent in Volllast betrieben werden, sind die Verluste durch Abblasen und Drosseln entsprechend hoch. Bei Aufsummierung der zeitabhängigen realen Volumenströme ergibt sich ein Spitzenwert von ca. 60% des maximalen Bedarfs, für den die Brennluftgebläse ausgelegt sind. Mit Hilfe eines analytischen Modells wurden kritische Betriebs- und Regelzustände ermittelt. Dabei wurden die wichtigsten Parameter der Brennluftversorgung wie Volumenstrom, Druck, Gebläsedrehzahl, Ein- und Zuschaltzeiten der Öfen variiert. Hierbei können bei Vorgabe eines flexiblen Gebläsesystems, bestehend aus einem oder mehreren Grundlast- und Regelgebläsen, unter Berücksichtigung ihrer Kennlinien und möglicher Betriebsgrenzen, Extremsituationen aufgezeigt und Ofeneinschalt- und Ausschaltzeiten optimiert werden. Umgekehrt ist damit auch eine Anforderungsbeziehung an Grundlast- bzw. Regelgebläsen möglich, wenn Prozessdaten für Volumenströme und Drücke für mehrere Öfen vorgegeben werden. Mit dem vorliegenden analytischen Tool ist die Auslegung von zentralen Brennluftversorgungssystemen für Industrieöfen bei der Projektierung von Neuanlagen oder Umbaumaßnahmen möglich.

Mit dem erstellten numerischen Simulationsmodell können die erforderlichen Gebläsevordrücke und Volumenströme unter Berücksichtigung der speziellen gasdynamischen Verhältnisse im realen Rohrleitungsnetz ermittelt werden. Damit ist für eine Neukonfiguration eine höhere Sicherheit gegen Prozessinstabilitäten gegeben, ohne dass kostenintensive strömungsmechanische Voruntersuchungen erforderlich sind.

Durch die Untersuchungen am Gebläseprüfstand konnten Drosselungs- und Teillaststrategien geprüft werden. Weiterhin wurden wichtige Erkenntnisse in Bezug auf das Regelverhalten bzw. die Regeldynamik beim Zusammenschluss von Radial- und Rootsgebläsen gewonnen.

In einem weiterführenden Projekt soll die Umsetzung der Forschungsergebnisse in einem realen Produktionsprozess verifiziert werden. Dann kann zudem z.B. die Erhöhung der Prozesssicherheit durch Stabilisierung des Verbrennungsprozesses und der Flammenqualität infolge einer ausgeprägten Luftsäule im zentralen Rohrleitungssystem und von Redundanzeffekten beim Ausfall von Luftgebläsen weitergehend untersucht werden. Diese Aspekte sind ebenfalls relevant bei Aggregaten, bei denen die Luft nicht nur zur Aufrechterhaltung des Verbrennungsprozesses, sondern auch zur Erzielung genau definierter Abkühlungsszenarien (Glühen Härten, Vergüten) benötigt wird.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Um die Ergebnisse weiterführend publik zu machen ist die Veröffentlichung in bekannten Branchenzeitschriften wie bspw. „Stahl und Eisen“ und/oder „Gaswärme International“ geplant.

## **Fazit**

Im Ergebnis des Forschungsprojektes wurde ein **Konzept zur bedarfsgerechten Brennluftversorgung** von Industrieöfen entwickelt. Das Konzept basiert auf einem neu entwickelten **analytischen Berechnungstool** (rechnerische Auslegung von druckstabilen Brennluftversorgungen), einem **numerischen Simulationstool** (Berücksichtigung/Ermittlung gasdynamischer Effekte im Rohrleitungssystem) und **Prüfstandtests** (Einbeziehung des speziellen Regelverhaltens bzw. der Regeldynamik).

Basierend auf den Prozessdaten einer ausgewählten realen Ofengruppe wurde nachgewiesen, dass mittels eines zentralisierten Gebläsesystems Abblas- und Drosselungsverluste in einem weiten Bereich vermindert werden können. Der Strombedarf kann gegenüber derzeitiger Anlagenkonfiguration um ca. 50 % gesenkt werden. Eine Erhöhung der Prozessstabilität beim Verbrennen und beim gezielten Abkühlen ist zu erwarten, muss jedoch im realen Produktionsprozess verifiziert werden. Unstreitig ist eine zu erwartende Verbesserung des Arbeits- und Gesundheitsschutzes infolge stark verminderter Emissionswerte für Lärm und Abluft, wenn sich die Gebläse außerhalb der Produktionshalle befinden.

Im Rahmen eines Folgeprojektes soll die Technik an einer Ofengruppe umgesetzt, die Auswirkungen auf den Produktionsprozess näher untersucht und die Praxistauglichkeit des neuen Konzeptes nachgewiesen werden.

Bericht Nr.: 44078

## Kurzfassung

Wärm- und Wärmebehandlungsprozesse der Stahlindustrie werden häufig in Chargenöfen durchgeführt, die in einem weiten Leistungsbereich geregelt werden. Jeder Ofen besitzt lokale Brennluftgebläse, die in der Regel Radialgebläse sind. Diese werden aufgrund ihres Regelverhaltens durchgehend im Volllastbetrieb gefahren. Luftüberschüsse werden entweder abgeblasen oder weggedrosselt, wodurch sich jedoch der Vordruck am Einzelbrenner und damit die Leistung ändern. Die Ofentemperatur wird geregelt durch die Brennertaktung (Zu- und Abschalten) in Verbindung mit Luft-Volumenstromänderungen durch Öffnen und Schließen von Drosselklappen. Prozessbedingt schwankt der Leistungsbereich der diskontinuierlich betriebenen Öfen in einem Bereich von bis 1:20. Die Nennleistung des Beheizungssystems wird üblicherweise nur zu etwa 5 % der Betriebszeit abgerufen. Der Brennluftbedarf verhält sich analog. Zu etwa zwei Dritteln der Zeit liegt er zudem deutlich unter 50 % der Auslegungsmenge. Trotz dieser hohen Teillastanteile erfolgt keine energieeffiziente Drosselung der Brennluftgebläse. Sie laufen typischerweise durchgehend unter Volllast. Diese nicht bedarfsgerechte Betriebsart ist weder energieeffizient noch umweltfreundlich.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeiten ist die Entwicklung eines Konzepts zur Zentralisierung der Brennluftversorgung mehrerer zu einer Gruppe zusammengefasster Öfen. Ein außerhalb der Produktionshalle installiertes Gebläsesystem bestehend aus Grundlast- und Regelgebläsen soll die Realisierung erforderlicher Teillaststrategien für bedarfsgerechte Brennluftzuführungen gewährleisten. Das Konzept besteht aus einem analytischen Tool zur Berechnung und Auslegung druckstabiler Brennluftvolumenströme, einem CFD-Simulationsmodell zur Berücksichtigung gasdynamischer Effekte im Rohrleitungssystem und einem Gebläseprüfstand zur Untersuchung des Regelverhaltens bzw. der Regeldynamik bei der Kopplung von Radialgebläsen (Grundlastgebläse) und RootsKolben- oder auch Drehkolbengebläsen (Regelgebläse).

Die wichtigsten Forschungsziele sind, eine verbesserte Energieeffizienz, eine Erhöhung der Stabilität des Verbrennungsprozesses sowie eine nachhaltige Verbesserung des Gesundheits- und Arbeitsschutzes durch stark gesenkte Lärmemissionen.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1.	Aufnahme und Bewertung des Istzustandes	1
1.1	Auswahl einer Ofengruppe	1
1.2	Drosselungs- und Teillaststrategien der ausgewählten Öfen	4
1.3	Betriebsmessungen und Prozessdatenerfassung	6
2.	Entwicklung einer flexiblen zentralen Brennluftversorgung	10
2.1	Berechnungstool zur Simulation möglicher Betriebszustände	10
2.2	Ermittlung der Maximalanforderungen an eine zentrale Gebläseeinheit	10
2.3	Auslegung der zentralen Gebläseeinheit	13
2.3.1	Grundlagen und verschiedene Gebläse-Charakteristiken	14
2.3.2	Auswahl der Regel- und Grundlastgebläse	17
2.3.2.1	Konzept und zusätzliche Randbedingungen	17
2.3.2.2	Einfluss des Regelbereichs des Regelgebläses auf Gebläseauswahl	18
2.3.3	Überprüfung der Gebläseauswahl	24
2.3.4	Optimierung von Vordrucksicherung und Grundlastgebläsebetrieb	28
2.3.5	Mögliche Regelungskonzepte	32
2.4	Rohrleitungsnetz und Speicher	36
2.4.1	Grundauslegung	36
2.4.2	CFD-Modell zur Simulation des entwickelten zentralen Brennluftversorgungssystems	40
2.4.2.1	Aufsetzen des Flomasternetzwerks	40
2.4.2.2	Ergebnisdiskussion der Flomastersimulationen	46
2.4.3	Speicher	55
2.5	Untersuchung, Vermessung und Verifizierung der zentralen Gebläseeinheit auf einem Gebläseprüfstand	56
2.5.1	Der verwendete Prüfstand	57
2.5.2	Messtechnische Untersuchung des Grundlastgebläses	59
2.5.3	Messtechnische Untersuchung des Regelgebläses	62
2.5.4	Messtechnische Untersuchung der neuen zentralen Gebläseeinheit	66
2.6	Energetische Bewertung	69
2.7	Ökologische und ökonomische Betrachtung, Übertragbarkeit der Ergebnisse	79
3.	Fazit	80
4.	Danksagung	86

## Abbildungsverzeichnis

Seite

Bild 1:	Ausgewählte Ofengruppe .....	2
Bild 2:	Herdwagenschmiedeofen HWSO 1 .....	3
Bild 3:	Radialgebläse- Kennlinie des HWSO 1 .....	4
Bild 4:	Brennervordruck und Radialgebläsedruck am Ofen HWSO 3 .....	6
Bild 5:	Ausschnitt: Brennervordruck der Brennluft am Ofen HWSO 3 .....	7
Bild 6:	Ausschnitt: Brennluftdruck nach dem Radialgebläse von Ofen HWSO 3 .	7
Bild 7:	Verbrauch von Brennluft Öfen 1 bis 4 (Zeitraum eine Woche, Abszisse = Zeit t [h]; Ordinate = Brennluftvolumenstrom [Nm <sup>3</sup> /h]) .....	9
Bild 8:	Gemessene Brennluft-Volumenströme der vier Öfen (Ist-Zustand), Zeitraum eine Woche.....	11
Bild 9:	Maximale Volumenströme der Ofengruppe .....	12
Bild 10:	Minimale Volumenströme der Ofengruppe, homogener Betrieb .....	13
Bild 11:	Kennlinienfeld eines typischen Radialgebläses .....	15
Bild 12:	Kennlinienfeld eines typischen RootsKolbengebläses .....	17
Bild 13:	Verhalten einer zentralen Brennluftgebläseeinheit bei unterschiedlichen Fördervolumenströmen des Regelgebläses .....	21
Bild 14:	Zusammenhang zwischen Nennvolumenstrom der Grundlastgebläse und max- sowie minimalem Fördervolumenstrom des Regelgebläses .....	23
Bild 15:	Grundlast- und Regelgebläse-Auslastungen für die realen Betriebsmessdaten der vier Öfen; Setting „real“ .....	24
Bild 16:	Grundlast- und Regelgebläse-Auslastung bei minimalem Brennluftbedarf der 4 Öfen; Setting „homogen“ .....	26
Bild 17:	Grundlast- und Regelgebläse-Auslastung bei maximalem Brennluftbedarf der 4 Öfen, Setting: „max.“ .....	27
Bild 18:	Vordruckänderung in Abhängigkeit einer Volumenstromänderung, oben: Regelgebläse; unten: Grundlastgebläse (beispielhaft anhand von mögliche Gebläsetypen) .....	29
Bild 19:	Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte), „max.“ (unten) bei dauerhaft eingeschaltetem GLG 1 .....	31
Bild 20:	Druckänderungsverhalten von Radialgebläsen in Abhängigkeit von Volumenstromänderung, ausgehend von verschiedenen Nennbetriebspunkten.....	33
Bild 21:	Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte), „max.“ (unten) bei dauerhaft eingeschaltetem. GLG 1, alle GLG mit verschobenem Betriebspunkt .....	35
Bild 22:	CAD-Layout der ausgewählten Ofengruppe im Hallenschiff .....	37

Bild 23:	Berechnete Brennluftvordruckverläufe an den Öfen 1 bis 4 für die Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte) und „max.“ (unten) .....	39
Bild 24:	Kennlinie-Grundlastgebläse.....	41
Bild 25:	Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, Version 1 .....	44
Bild 26:	Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, Version 2.....	45
Bild 27:	Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung, Version 1/ Fall 2....	46
Bild 28:	Berechnete Drücke der Brennluftverteilung, Version 1/ Fall 2 .....	47
Bild 29:	Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, modifizierte Version 1.	48
Bild 30:	Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung mit dem modifizierten Flomasternetzwerk, Version 1/ Fall 2.....	49
Bild 31:	Berechnete Drücke der Brennluftverteilung mit dem modifizierten Flomasternetzwerk, Version 1/ Fall 2.....	50
Bild 32:	Fall 1a: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil geschlossen.....	51
Bild 33:	Fall 1a: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil geschlossen .....	51
Bild 34:	Fall 1b: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil aktiv	52
Bild 35:	Fall 1b: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil aktiv .....	52
Bild 36:	Fall 2a: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil geschlossen.....	53
Bild 37:	Fall 2a: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil geschlossen .....	54
Bild 38:	Fall 2b: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil aktiv	54
Bild 39:	Fall 2b: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m <sup>3</sup> /h, Abblaseventil aktiv .....	55
Bild 40:	Per Frequenzumformer drehzahlregelbarer Antriebsmotor für Drehkolbengebläse (links) und Messwerterfassung der Volumenstrommessstrecke (rechts) .....	57
Bild 41:	R&I-Schema des Prüfstandes.....	58
Bild 42:	Fotografische Ansicht der verwendeten Volumenstrommessstrecke.....	58
Bild 43:	Kennfeld und Wirkungsgradverlauf bei Nenndrehzahl (PILLER Typ 3246MN80225, ohne weitere Anbauteile).....	60
Bild 44:	Kennfeld bei Nenndrehzahl, mit und ohne staubbeladenem Luftfilter (PILLER Typ 3246MN80225, ohne weitere Anbauteile) .....	61



Bild 45:	Kennfeld und Wirkungsgrad für fünf sehr niedrige Drehzahlen in für Drehkolbengebläse typische Darstellung: $V(p_t)$ , $\eta(p_t)$ , (J&H Typ RV52/53) .....	64
Bild 46:	Kennfeld und Wirkungsgradverlauf für fünf sehr niedrige Drehzahlen in für Radialgebläse typischer Darstellung: $p_t(V)$ , $\eta(V)$ , (J&H Typ RV52/53) ....	65
Bild 47:	Drehzahl und Wirkungsgrad in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms bei einer konstanten Totaldruckerhöhung von $p_t = 80$ mbar (J&H Typ RV52/53) .....	66
Bild 48:	Kennlinien der Gebläseeinheit mit und ohne saugseitigem Luftfilter am GLG (GLG bei Nenndrehzahl, RG mit $946 \text{ min}^{-1}$ ) .....	67
Bild 49:	Vergleich der summierten Einzelvolumenströme von Radial- und Drehkolbengebläse mit dem messtechnisch erfassten Gesamtvolumenstrom (GLG: Nenndrehzahl; RG: $946 \text{ min}^{-1}$ ) .....	69
Bild 50:	Einfluss der Leistungsverhältnisse zwischen Drehkolbengebläse und Radialgebläse auf die energetische Gesamteffizienz. ....	71
Bild 51:	Szenario „real“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten) .....	73
Bild 52:	Szenario „real“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 45 % ...	74
Bild 53:	Szenario „max.“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten) .....	75
Bild 54:	Szenario „max.“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 50 % ...	76
Bild 55:	Szenario „homogen“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten) .....	77
Bild 56:	Szenario „homogen“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 44 % ...	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Kennwerte der Radialgebläse für die ausgewählte Ofengruppe .....	3
Tabelle 2: Ausgewählte Gebläse einer zentralen Brennluftversorgung der Ofengruppe.....	24
Tabelle 3: Daten der Grundlastgebläse, Hersteller: CIMME, Typ: GBJ F08040 .....	41
Tabelle 4: Volumen- und Massenströme an den vier Öfen.....	42

## Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
P	Elektrische Leistung	kW
HWSO	Herdwagenschmiedeofen	
SKO	Schmiedekammerofen	
Q	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h; m <sup>3</sup> /min; m <sup>3</sup> /s; Nm <sup>3</sup> /h
p	Druck	mbar; bar; Pa
p <sub>t</sub>	Totaldruckerhöhung	mbar; bar; Pa
t	Zeit	s; min; h
$\dot{V}_{Luft}$	Brennluftvolumenstrom	m <sup>3</sup> /h i.N. Nm <sup>3</sup> /h=Norm- m <sup>3</sup> /h Bm <sup>3</sup> /h= Betriebs- m <sup>3</sup> /h
λ	Verbrennungsluftverhältnis	
L <sub>min</sub>	Mindestluftbedarf	m <sup>3</sup> <sub>Luft</sub> /m <sup>3</sup> <sub>Gas</sub> .i. N
L <sub>Nenn</sub>	Nenn-Volumenstrom (Herstellerangabe)	m <sup>3</sup> /h i.N.
L <sub>max,m</sub>	maximal gemessener Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h i.N.
L <sub>max</sub>	maximaler Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h i.N.
L <sub>mittel</sub>	mittlerer Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h i.N.
GLG	Grundlastgebläse	
RG	Regelgebläse	
η	Wirkungsgrad	
n	Drehzahl	min <sup>-1</sup> (= UPM)
q <sub>m</sub>	Massenstrom	kg/s

# 1. Aufnahme und Bewertung des Istzustandes

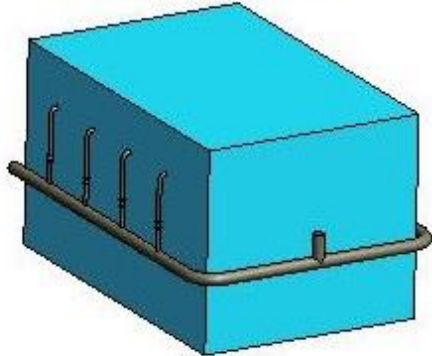
## 1.1 Auswahl einer Ofengruppe

In einem mittelständischen Unternehmen mit Freiformschmiede und Wärmebehandlung, das über Wärm- und Wärmebehandlungsöfen für Chargengewichte bis zu 80 t und Chargenlängen bis zu 8 m verfügt, wurde eine Ofengruppe bestehend aus vier Öfen ausgewählt. Die relevanten Prozessparameter dieser vier Öfen dienen als Basis der im Projekt durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen.

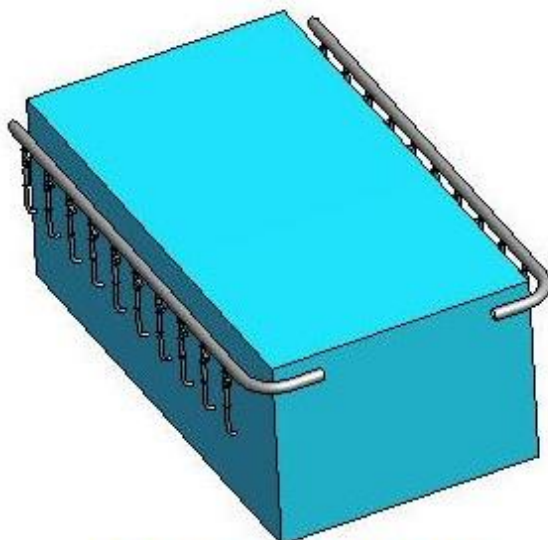
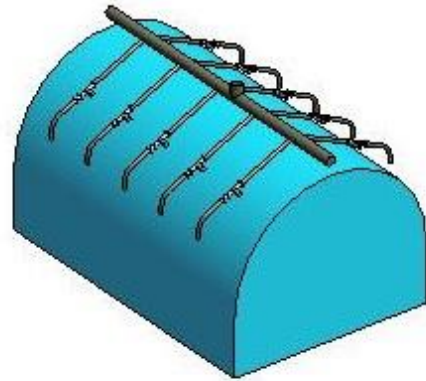
Kriterien zur Auswahl der Öfen sind neben räumlicher Nähe die Leistungen der installierten Öfen- bzw. deren Brennluftgebläse. Die räumliche Nähe begünstigt die Auslegung und Dimensionierung des erforderlichen Rohrleitungssystems bei zentralisierter Brennluftversorgung. Die Größe der Ofen- und Gebläseleistungen bzw. der damit einhergehenden Energie- und Abblase- bzw. Drosselverluste korrelieren mit der Effizienz des neuen Konzepts zur Brennluftzuführung.

Die Wärm- und die Wärmebehandlungsöfen unterscheiden sich u.a. in Luftbedarf und Luftverwendung. In Wärmöfen wird Schmiedegut gleichmäßig auf eine bestimmte Temperatur erwärmt, in Wärmebehandlungsöfen wird entsprechend der geforderten temperaturabhängigen Gefügebestandteile erwärmt und definiert abgekühlt. Das heißt, die Gebläseluft wird bei Wärmebehandlungsöfen nicht nur als Brennluft zur Beheizung benötigt, sondern auch als Kühlluft für Abkühlvorgänge. Bei dem im Forschungsprojekt kooperierenden Unternehmen werden die Luftvolumenströme nicht gemessen. Es werden nur die Brenngas-Volumenströme digital erfasst und archiviert. Bei konstantem Verbrennungsluftverhältnis  $\lambda$  kann man die Brennluftvolumenströme aus den Gasvolumenströmen errechnen. Damit sind Luftvolumenströme für die Wärmöfen (reine Beheizung) bekannt, die Luftvolumenströme an Wärmebehandlungsöfen (Beheizung und Kühlung) jedoch nicht. Für die Untersuchungen wurde daher eine Gruppe bestehend aus vier Wärmöfen (**Bild 1**) ausgewählt. Dabei handelt es sich um drei Herdwagenschmiedeöfen und einen Schmiedekammerofen, welche sich in der Anzahl der Brenner (8 bis 20 Brenner), der Brennerleistungen (300 bis 400 kW) und der Gesamt-Ofenleistungen (Bereich 1.500 kW bis 3.600 kW) unterscheiden. Die elektrischen Anschlussleistungen der Brennluftgebläse liegen im Bereich 12 bis 15 kW.

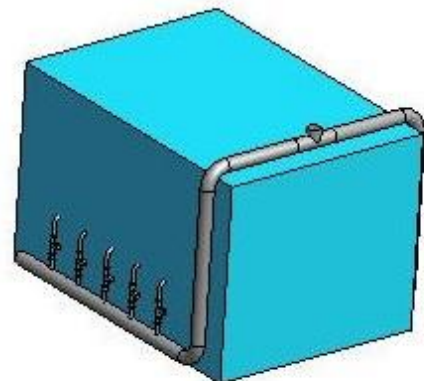
**Ofen 1 (SKO2)**  
1 Gebläse 15 kW  
Durchfluss 22-63 Nm<sup>3</sup>/min  
Brenner 2 x 4 St



**Ofen 3 (HWSO 2)**  
Gebläse 15 kW  
Durchfluss 7 Nm<sup>3</sup>/min  
Brenner 2 x 5 St



**Ofen 2 (HWSO 1)**  
2 Gebläse je 15 kW  
Durchfluss 22-63 Nm<sup>3</sup>/min  
Brenner 2 x 10 St



**Ofen 4 (HWSO 3)**  
Gebläse 12,2 kW  
Durchfluss 50 Nm<sup>3</sup>/min  
Brenner 2 x 5 St

**Bild 1:** Ausgewählte Ofengruppe

Der leistungsstärkste Ofen ist der HWSO 1 (**Bild 2**), ausgerüstet mit 2 x 10 Brennern und einer Ofenleistung von 3.600 KW.



**Bild 2:** Herdwagenschmiedeofen HWSO 1

Die technischen Kennwerte der Radialgebläse für die ausgewählten Öfen sind in **Tabelle 1** dargestellt.

**Tabelle 1:** Technische Kennwerte der Radialgebläse für die ausgewählte Ofen-  
gruppe

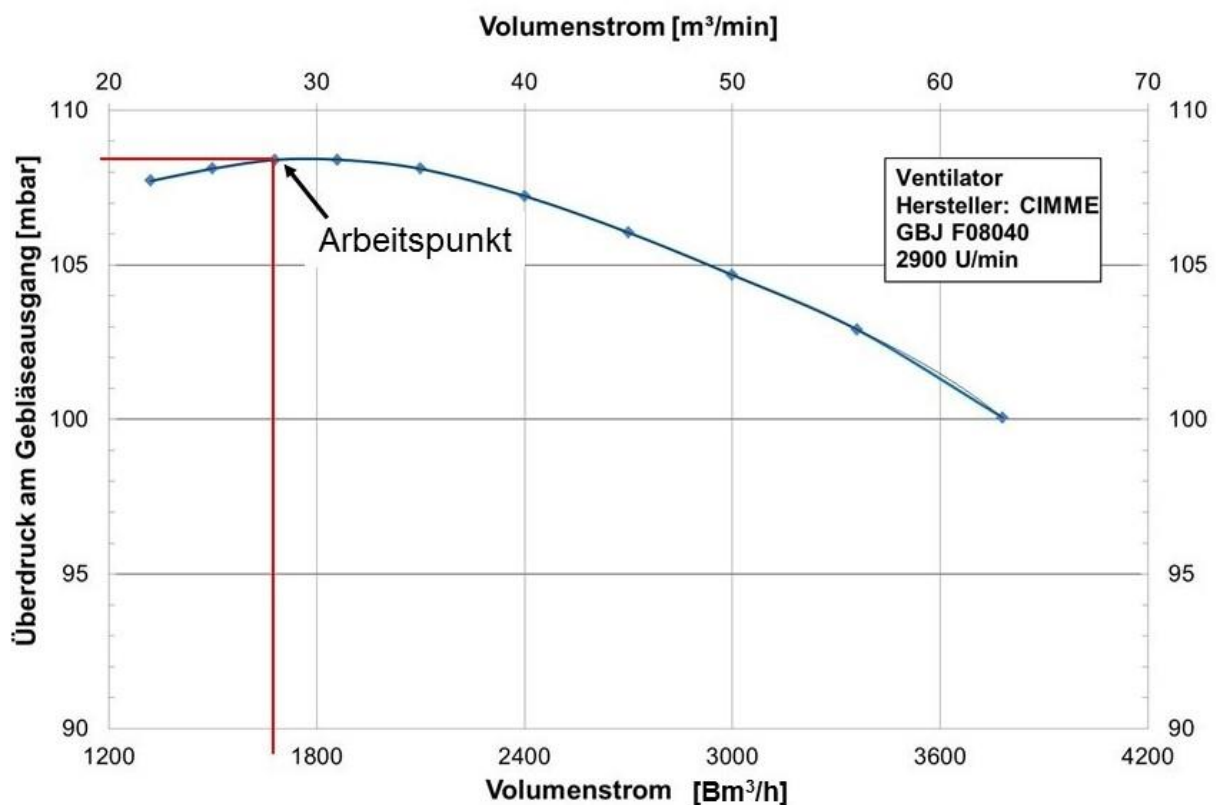
Ofen	Anschlusswert Brennluft	Br.Zahl	Vordruck Brennluft am Brenner	Leistung Ventilator	Leistung Brenner	Leistung Ofen	
	m <sup>3</sup> /h i.N.		mbar	kW <sub>el</sub>	kW <sub>therm</sub>	kW <sub>therm</sub>	
SKO2	3.200	8	20	15	300	2400	Zentralreku
HWSO1	4.000	20	40	2 X 15	400	4000	Regenerator
HWSO2	2.000	10	40	11	300	1500	Regenerator
HWSO3	4.000	10	35	15	300	3000	Zentralreku

Beim Einsatz von thermischen Regeneratoren zur Brennluftvorwärmung eingesetzt wird für jeden Brenner im Brennbetrieb, über den gerade Brenngas verbrannt wird, ein Brenner im Saugbetrieb benötigt, über den das entstehende Abgas abgesaugt wird. Im wechselseitigen Betrieb werden so Wärmespeicher in den Regeneratoren bei Abgasabsaugung beladen und bei Brennbetrieb entladen. Maximal die Hälfte der Brenner kann gleichzeitig betrieben werden, wobei gleichzeitig über die andere Häl-

te Abgas abgesaugt wird. Daher wird für die Berechnung der Ofenleistung die halbe Brennerzahl angesetzt. Bei Anwendung von kontinuierlich betriebenen Zentralreku- peratoren zur Brennluftvorwärmung kann die volle Brenneranzahl zur Leistungsbe- rechnung angesetzt werden.

## 1.2 Drosselungs- und Teillaststrategien der ausgewählten Öfen

Die Radialgebläse zur Brennluftversorgung der vier ausgewählten Öfen werden per- manent im stationären Volllastbetrieb gefahren. Die Betriebsweise der Radialgebläse kann mittels ihrer Kennlinie beschrieben werden (**Bild 3**).



**Bild 3:** Radialgebläse- Kennlinie des HWSO 1

Aus ofen- oder anlagentechnischer Sicht soll ein Brennluftgebläse die zeitvarianten Volumenströme bei möglichst konstantem Druck erzeugen. Dabei müssen die Sys- temwiderstände (Druckverluste) in Abhängigkeit vom Volumenstrom überwunden werden. Der Arbeitspunkt des Gebläses ist so einzustellen, dass die erforderlichen Volumenströme bei entsprechenden Systemdruckverlusten durch die Gebläse- Kennlinie abgedeckt sind. Der in **Bild 3** dargestellte Arbeitspunkt ergibt sich dem- nach als Schnittpunkt der Anlagen- bzw. Ofenkennlinie mit der Gebläse-Kennlinie.

Der für den Verbrennungsprozess des Ofens HWSO 1 erforderliche Brennluftvordruck liegt im Bereich zwischen 90 bis 110 mbar. Zur Aufrechterhaltung dieses Druckbereiches wird das Gebläse mit einer Drehzahl von  $2.900 \text{ min}^{-1}$  betrieben. Der Brennluftdruck ist für die Qualität der Flamme, die Heizleistung des Brenners sowie die Abgaswerte von großer Bedeutung. Die Regelgröße des Ofens ist die Ofentemperatur, welche durch die Heizleistung der Brenner bestimmt wird. Durch Brennertaktung, also Zu- und Abschalten von einzelnen Brennern, wird die Ofentemperatur geregelt. Mit dem Zu- und Abschalten von Brennern müssen natürlich auch die Gesamt-Brennluft-Volumenströme erhöht (bei Brennerzuschaltung) und vermindert (bei Brennerabschaltung) werden. Dazu werden Drosselklappen und/oder Regelventile vor den jeweiligen Brennern geöffnet bzw. geschlossen. Der Betriebspunkt des Gebläses wird so gewählt, dass er in einem möglichst waagerechten Bereich der Kennlinie liegt, damit Veränderungen am Volumenstrom nur geringe Änderungen am vom Gebläse erzeugten Vordruck verursachen. Wird der Volumenstrom zu stark gedrosselt, erreichen Radialgebläse die sogenannte Pumpgrenze, was einem instabilen Zustand entspricht und zu vermeiden ist. Bei zu hohem Volumenstrom unterschreitet der Druck die zulässige Grenze.

Werden Industrieöfen im unteren Teillastbereich betrieben, sind nur noch sehr wenige Brenner gleichzeitig in Betrieb. Die Luftabnahme sinkt dann soweit, dass ohne weitere Maßnahmen die Pumpgrenze des zugehörigen Brennluftgebläse erreicht würde.

Der erzeugte Ausgangsdruck, bzw. die erzeugbare Druckerhöhung ist vom Quadrat der Gebläsedrehzahl.

**Gleichung 1:**  $p \sim n^2$

und die Förderleistung linear von der Drehzahl

**Gleichung 2:**  $\dot{V} \sim n$

abhängig. Damit ist der erzeugte Druck abhängig vom Quadrat des geförderten Volumenstroms.

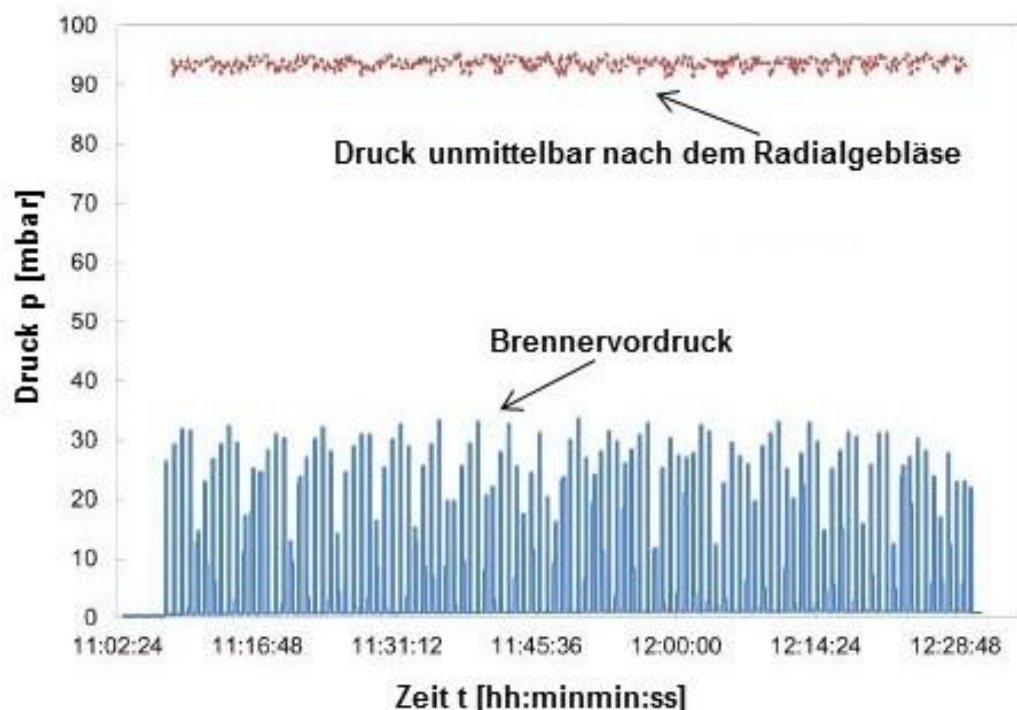
**Gleichung 3:**  $p \sim \dot{V}^2$

Eine Reduzierung der Drehzahl ist nicht ohne weiteres möglich, da die Brenner einen konstanten Brennluftvordruck benötigen. Der nicht benötigte Luftvolumenstrom wird daher abgeblasen, auch wenn diese Maßnahme naturgemäß energetisch höchst ineffizient ist.

### 1.3 Betriebsmessungen und Prozessdatenerfassung

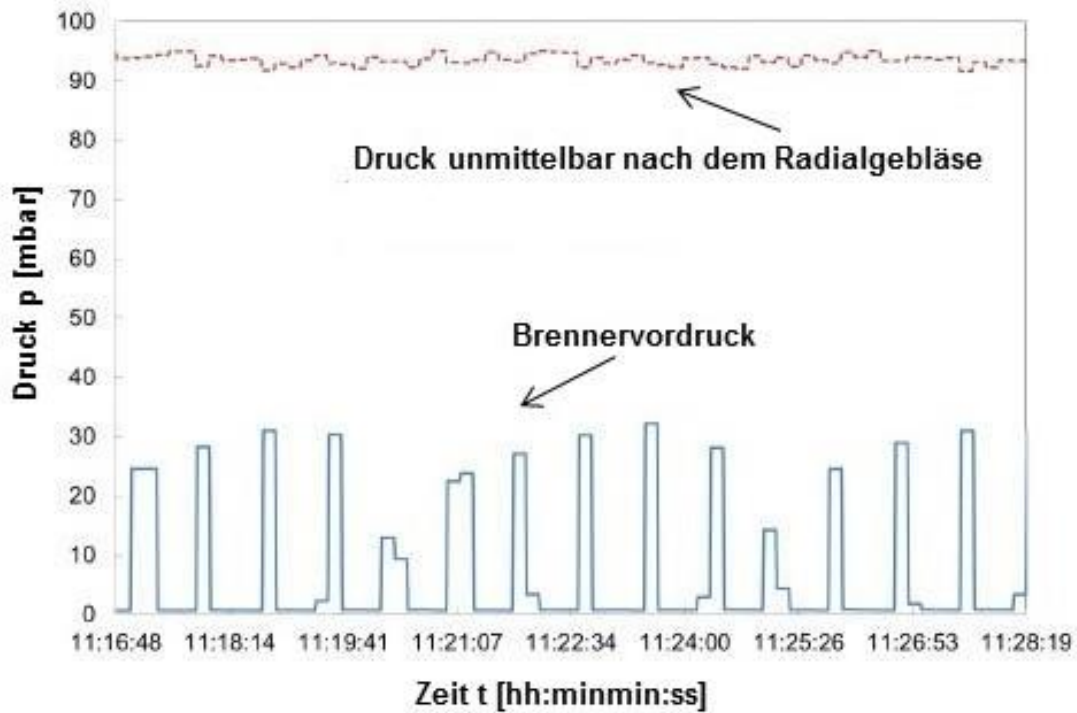
#### A) Betriebsmessungen

Die Ermittlung und Auswertung einer realen Datenbasis ist die Grundlage für die Entwicklung bedarfsgerechter Teillaststrategien zur Brennluftversorgung der ausgewählten Ofengruppe (siehe Kap. 1.1). Die wichtigsten Prozessparameter hierbei sind die zeitabhängigen Brennluftdrücke und Brennluftvolumenströme. Die Drücke werden von der Betreiberfirma nicht dokumentiert. Aus diesem Grund wurden Betriebsmessungen für die Brennluft-Drücke unmittelbar nach den Radialgebläsen sowie für die (Vor-) Drücke vor den Brennern durchgeführt. Die Radialgebläsemotoren laufen nach Aussage der Betreiberfirma permanent in Vollast. Die überschüssige Luft wird abgeblasen oder gedrosselt. Ausschnitte aus der Messkampagne sind in **Bild 4**, **Bild 5** und **Bild 6** dargestellt.

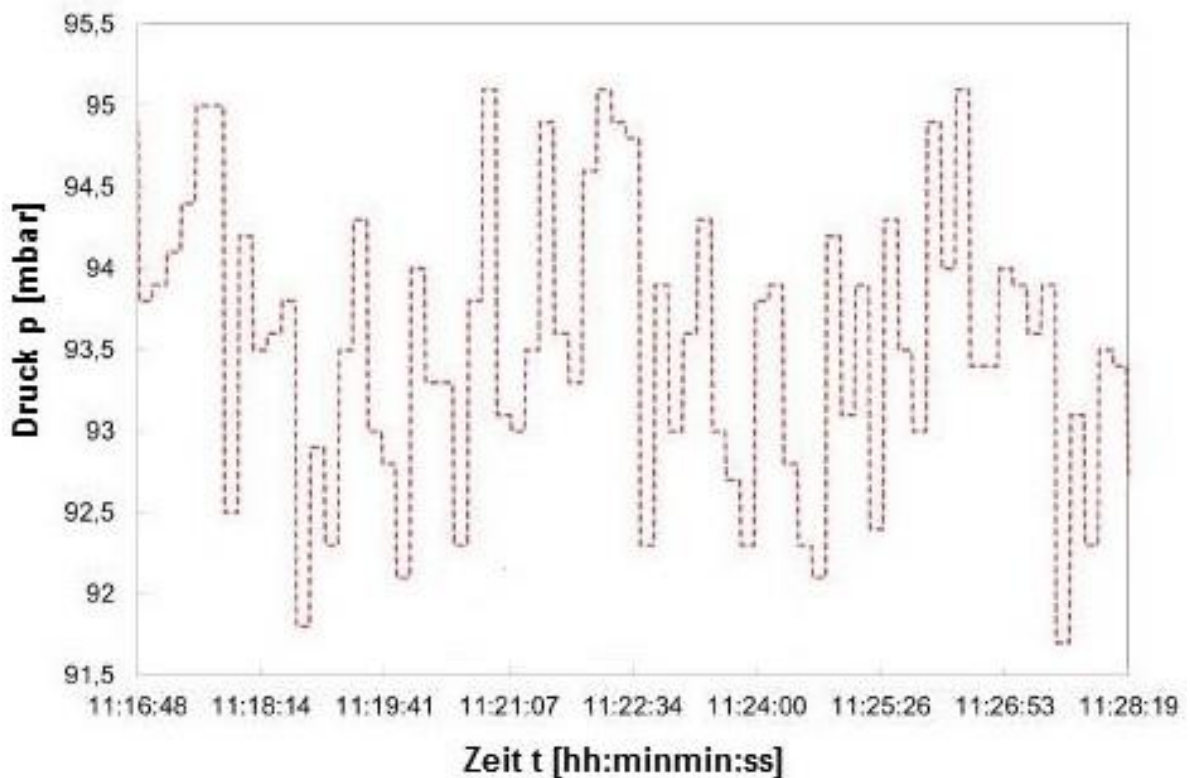


**Bild 4:** Brennervordruck und Radialgebläsedruck am Ofen HWSO 3





**Bild 5:** Ausschnitt: Brennervordruck der Brennluft am Ofen HWSO 3



**Bild 6:** Ausschnitt: Brennluftdruck nach dem Radialgebläse von Ofen HWSO 3

Die blauen Linien zeigen den typischen Verlauf der gemessenen Brennervordrücke am Ofen HWSO 3. Im Ausschnitt (**Bild 5**) ist die Taktung des Brenners gut erkennbar. Beim Abschalten des Brenners wird die überschüssige Brennluft abgeblasen. Der Brennluftdruck unmittelbar nach dem Radialgebläse (rote Linie) beträgt ca. 93,5 mbar. Die Druckschwankungen entstehen beim Zu- und Abschalten der Brenner. Dies entspricht dem typischen Betriebsverhalten eines Radialgebläses und spiegelt seine Kennlinie wider.

## B) Betriebsdatenerfassung

Bei der Betreiberfirma wird der Brenngasverbrauch erfasst und archiviert, jedoch nicht der Brennluftverbrauch. Daher wurden die Daten der Brenngasverbräuche der vier betrachteten Öfen für einen Zeitraum von einer Woche aufbereitet und ausgewertet. Der Brennluftverbrauch wurde über die Luftzahl  $\lambda$  ermittelt nach

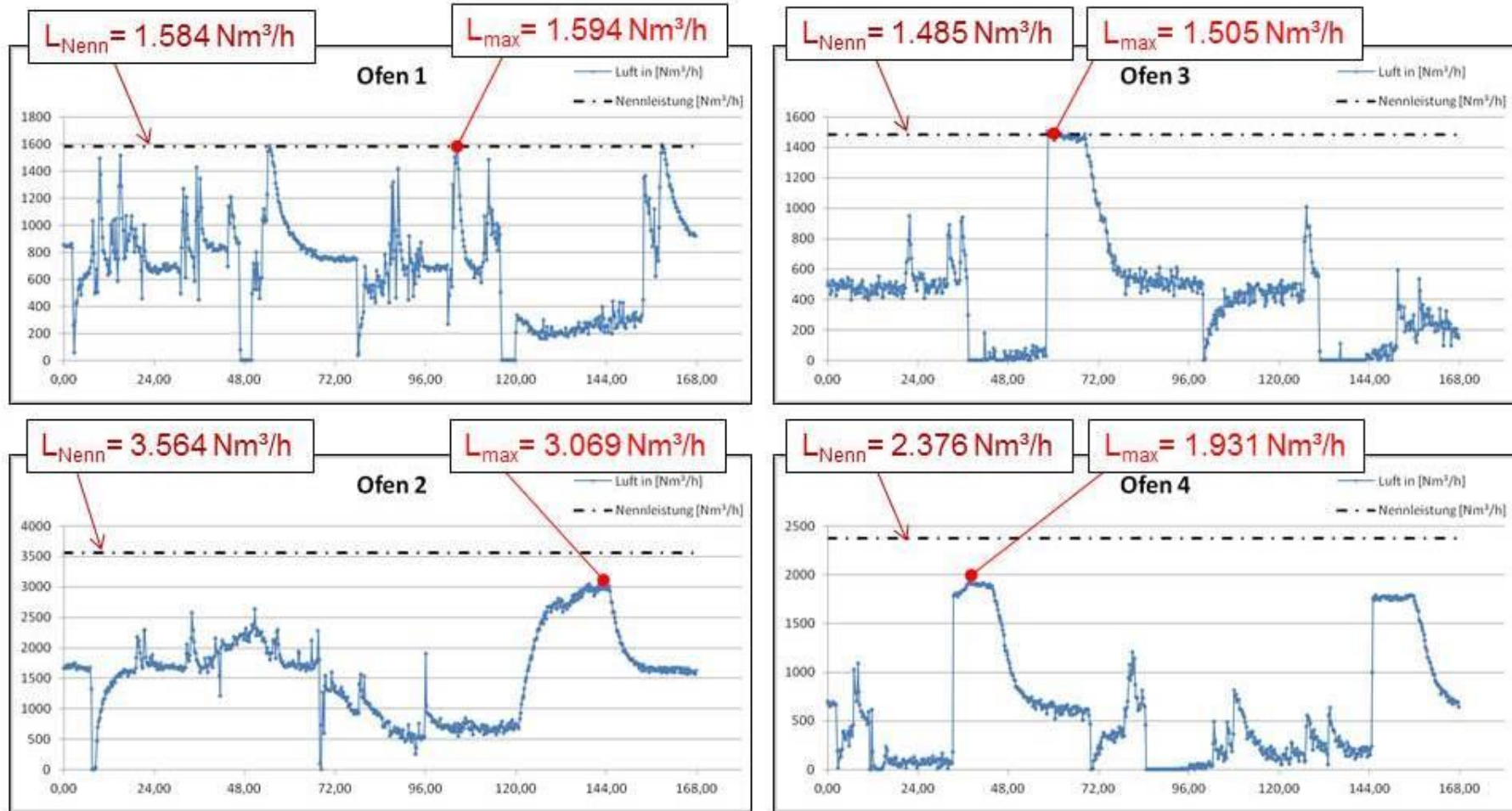
**Gleichung 4:** 
$$\dot{V}_{Luft} = \lambda * L_{min}.$$

Dabei sind

- $\dot{V}_{Luft}$  der Brennluftvolumenstrom in  $m^3/h$  i. N.,
- $\lambda$  das Verbrennungsluftverhältnis, das fest auf den Wert 1,1 gesetzt ist und
- $L_{min}$  der Mindestluftbedarf in  $m^3_{Luft}/m^3_{Gas}$  i. N, der bei dem eingesetzten Brenngas einen Wert von 9 besitzt.

In **Bild 7** sind die Verbräuche von Brennluft für die ausgewählte Ofengruppe für einen einwöchigen Zeitraum dargestellt. Die Maxima der Volumenströme der einzelnen Öfen sind mit „ $L_{max}$ “, die Nenn-Volumenströme mit „ $L_{nenn}$ “ und die mittleren Volumenströme mit „ $L_{mittel}$ “ bezeichnet. Es ist erkennbar, dass bei den Öfen 1 und 3 die Nennlast nur zu etwa < 7% der Betriebszeit abgerufen wird. Die Öfen 2 und 4 erreichen zu keiner Zeit den Nennlastbereich. Wie oben bereits beschrieben, laufen die zugehörigen Brennluftgebläse jedoch unabhängig vom tatsächlichen Brennluftbedarf immer mit ihrer vollen Nennleistung.

Die Auswertungen zeigen, dass bei der aktuellen Betriebsweise sehr große Abblas- bzw. Drosselverluste und damit Energieverluste an den Brennluft-Radialgebläsen erzeugt werden.



**Bild 7:** Verbrauch von Brennluft Öfen 1 bis 4 (Zeitraum eine Woche, Abszisse = Zeit t [h]; Ordinate = Brennluftvolumenstrom [Nm³/h])

## **2. Entwicklung einer flexiblen zentralen Brennluftversorgung**

### **2.1 Berechnungstool zur Simulation möglicher Betriebszustände**

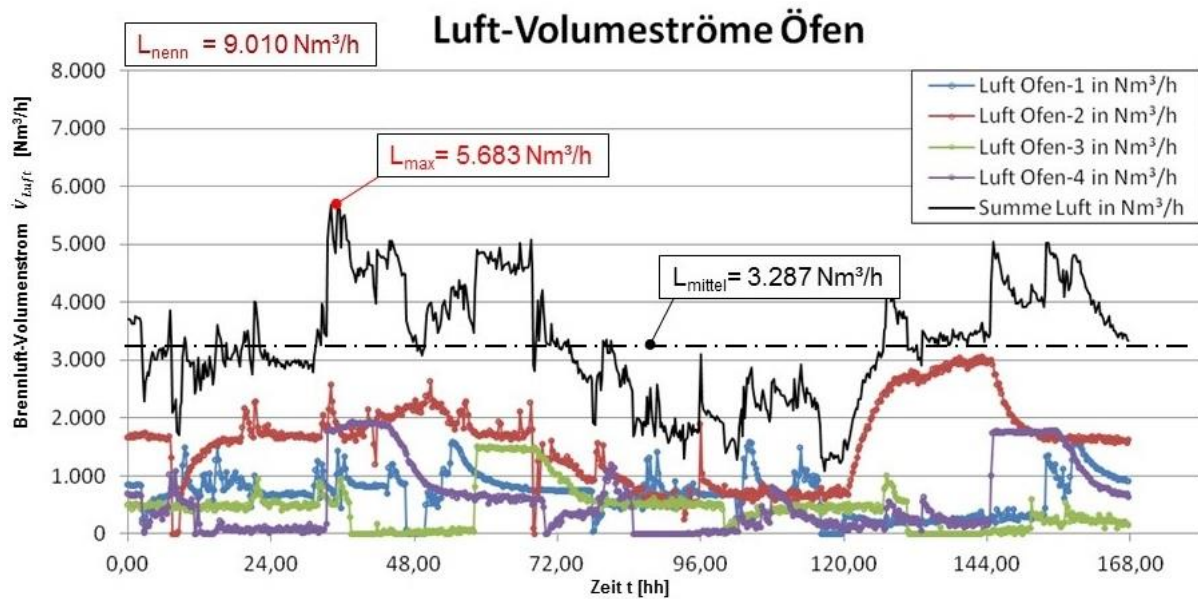
Da ein grundlegender Baustein zur angestrebten energetischen Optimierung der Brennluftversorgung von Industrieöfen die Entwicklung einer zentralen Brennluftversorgung ist, wurde ein **Excel-basiertes analytisches Modell (Berechnungstool)** entwickelt, mit welchem es möglich ist, die Anforderungen an eine solche zentrale Brennluftversorgung für eine ganze Ofengruppe auf Basis der ermittelten Betriebsdaten einzelner Öfen zu simulieren. Außerdem kann mit dem entwickelten Modell die zentrale Brennluftversorgung flexibel aus verschiedenen Radialgebläsen als Grundlastgebläsen (GLG) und einem Drehkolbengebläse als Regelgebläse (RG) zusammengestellt werden. Dabei können verschiedene Charakteristiken sowie Zu- und Abschaltbedingungen für die GLG hinterlegt werden um untersuchen zu können, welche Kombinationen und Regelstrategien für die Brennluftversorgung einer gesamten Ofengruppe, je nach Betriebsweise der Öfen, am sinnvollsten sind.

Im Wesentlichen bietet das Modell folgende Möglichkeiten:

- flexible Kombinierung verschiedener Ofenfahrten
- automatische Auswertung von Extrempunkten
- flexible Vorgabe des Gebläseparks
- individuelle Gebläsekonfigurationen (Betriebsgrenzen, Kennfelder)
- automatische Berechnung der Zu- und Abschaltzeitpunkte für Grundlastgebläse
- automatische Berechnung der Anforderungen an das Regelgebläse
- automatische Auswertung von Laufzeiten.

### **2.2 Ermittlung der Maximalanforderungen an eine zentrale Gebläseeinheit**

Im ersten Schritt wurde das entwickelte Tool genutzt, um wesentliche Anforderungsszenarien an eine zentrale Gebläseeinheit zu ermitteln. Hierzu wurden alle messtechnisch erfassten Brennluftvolumenströme der untersuchten Industrieöfen (s. u.a. **Bild 7**) in das Modell integriert. **Bild 8** zeigt die einfache Addition der messtechnisch erfassten Brennluftvolumenströme der einzelnen Öfen zu einem Gesamtbrennluftbedarf der gesamten Ofengruppe.



**Bild 8:** Gemessene Brennluft-Volumenströme der vier Öfen (Ist-Zustand), Zeitraum eine Woche

Es ist zu erkennen, dass das sich ergebende Maximum des „realen“ Gesamtvolumenstroms mit etwa 5.700 m<sup>3</sup>/h i.N. weit entfernt ist, vom theoretischen Maximum, welches sich zu etwa 9.000 m<sup>3</sup>/h i.N. ergeben würde, wenn alle Öfen zeitgleich ihren maximalen Brennluftbedarf abfordern würden, vgl. hierzu Kapitel 1.3 und Bild 7.

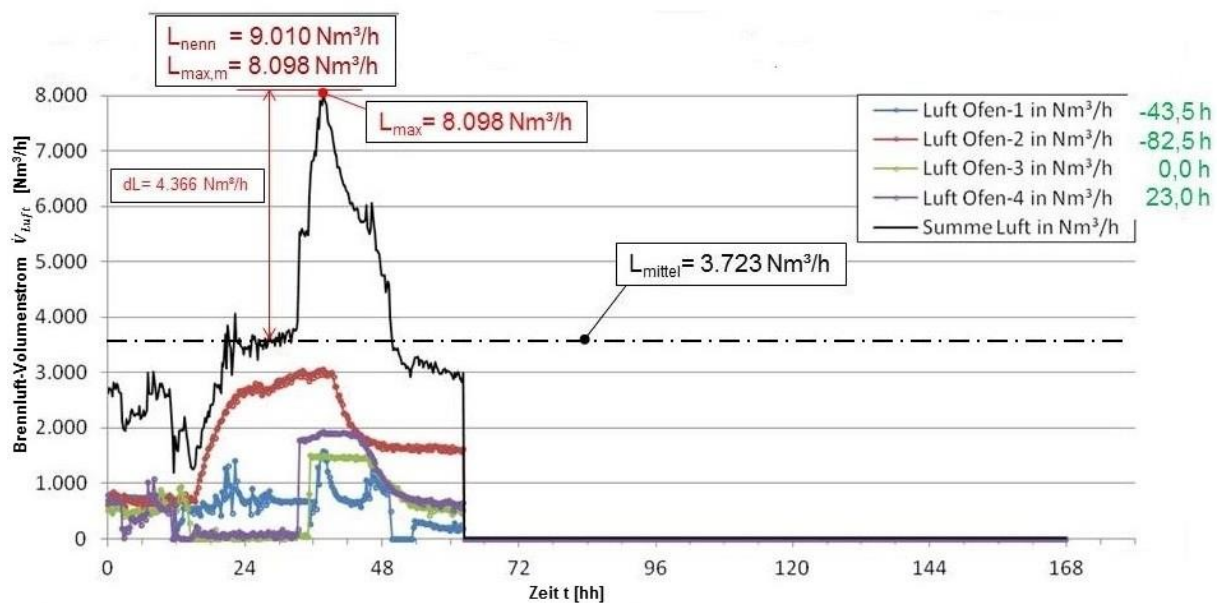
Die zentrale Versorgung mehrerer Öfen mit Brennluft führt durch Überlagerungseffekte und zeitliche Verschiebung der individuellen Maxima gegeneinander, wie erwartet, zu einer Glättung des Gesamtluftbedarfs sowie zumeist auch zu einer Reduzierung des maximalen Gesamtluftbedarfs. Im hier betrachteten Zeitraum lag der mittlere Gesamtbrennluftvolumenstrom beispielsweise bei ca. 3.300 Nm<sup>3</sup>/h. Gedeckt wurde dieser Bedarf in der Realität jedoch durch vier Einzelgebläse (die beiden Gebläse am Ofen 2 werden als ein Gebläse betrachtet) mit einer Gesamtförderleistung von mehr als 9.000 m<sup>3</sup>/h i.N., welche alle unter Vollast liefen, was im schlimmsten Fall zu Abblaseverlusten von 63 % führt. Das verdeutlicht noch einmal das energetische Optimierungspotential einer zentralen Brennluftversorgung.

Zur Auslegung der Zentralen Gebläseeinheit ist es jedoch erforderlich, auch extreme Anforderungssituationen im Vorfeld bewerten zu können.

Um Extrempunkte in der Brennluftanforderung ermitteln zu können, wurden daher die einzelnen real gemessenen Brennluftvolumenstromverläufe der einzelnen Öfen in einem zweiten Schritt zeitlich so gegeneinander verschoben, dass der Gesamtvolumen-

menstrom Maxima entwickelte. So wurden verschiedenste extreme Betriebsituationen simuliert, wie sie sich beispielsweise nach langen Wochenenden oder Feiertagen ergeben, wenn alle Öfen der untersuchten Gruppe zeitlich wieder angeheizt werden und somit alle annähernd zeitlich ihren maximalen Leistungsabruf und damit den maximalen Brennluftbedarf erreichen.

Ein Worst-Case-Betriebszustand ist in **Bild 9** dargestellt. Hier wurden die lokalen Maxima der gemessenen Brennluft-Volumenströme durch entsprechende zeitliche Verschiebungen aufsummiert, um ein absolutes Maximum zu erreichen. Nach diesem Worst-Case-Wert ist die zentrale Gebläseeinheit auszulegen.



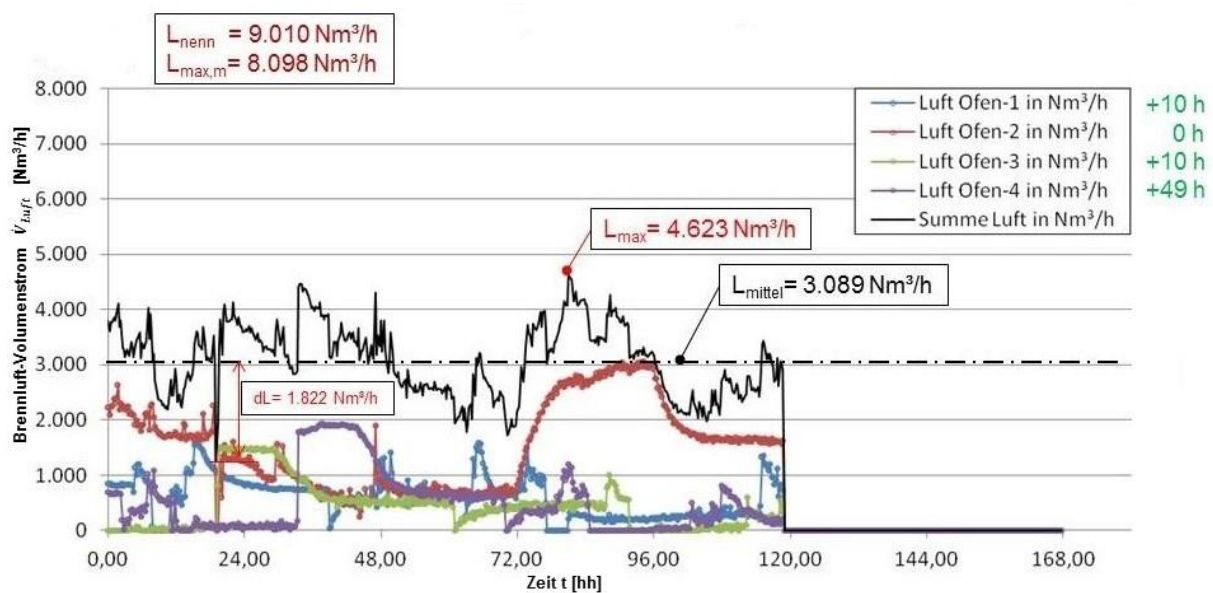
**Bild 9:** Maximale Volumenströme der Ofengruppe

Die zentrale Gebläseeinheit muss die Versorgung der Ofengruppe mit Brennluft auch dann sicherstellen können, wenn alle vier Öfen ihren maximalen Bedarf zum gleichen Zeitpunkt haben. Dieser Betriebszustand wurde mittels einer virtuellen zeitlichen Verschiebung (siehe Zeitangaben in „Grün“, **Bild 9**) der individuellen Volumenströme erzeugt. In „grün“ sind die Differenzen für die virtuellen Zeitverschiebungen aufgezeigt.

Das andere „Extrem“ der möglichen Betriebszustände wäre ein maximal homogener Verlauf des Gesamtbrennluftbedarfs. Ein solcher Verlauf könnte sich beispielsweise auch ohne eine aktive zeitliche Synchronisierung der einzelnen Öfen ergeben, wenn alle Öfen der Gruppe ein einziges, nachgelagertes Aggregat wie beispielsweise ein

Walzwerk bedienen. In einem solchen Fall werden die Öfen umlaufend nacheinander be- bzw. entladen, was dazu führt, dass individuelle Extrempunkte im Brennluftbedarf einzelner Öfen nie mit denen anderer Öfen zusammenfallen.

Ein solcher logistischer Verbund liegt bei den hier beispielhaft untersuchten Öfen nicht vor, weshalb der maximal homogene Verlauf des Gesamtbrennluftbedarfs durch eine individuelle zeitliche Verschiebung der einzelnen Ofenfahrten gegeneinander ermittelt werden musste. Das Ergebnis sowie die hierzu ermittelten individuellen Zeitverschiebungen sind in **Bild 10** dargestellt.



**Bild 10:** Minimale Volumenströme der Ofengruppe, homogener Betrieb

Die drei genannten Szenarien

- „Real“ (**Bild 8**): wie gemessen, keine zusätzliche zeitliche Verschiebung
- „Max“ (**Bild 9**): maximaler Gesamtbrennluftvolumenstrom
- „Homogen“ (**Bild 10**): maximale Gleichmäßigkeit im Gesamtvolumenstrom

werden beispielhaft für alle weiteren Untersuchungen verwendet.

### 2.3 Auslegung der zentralen Gebläseeinheit

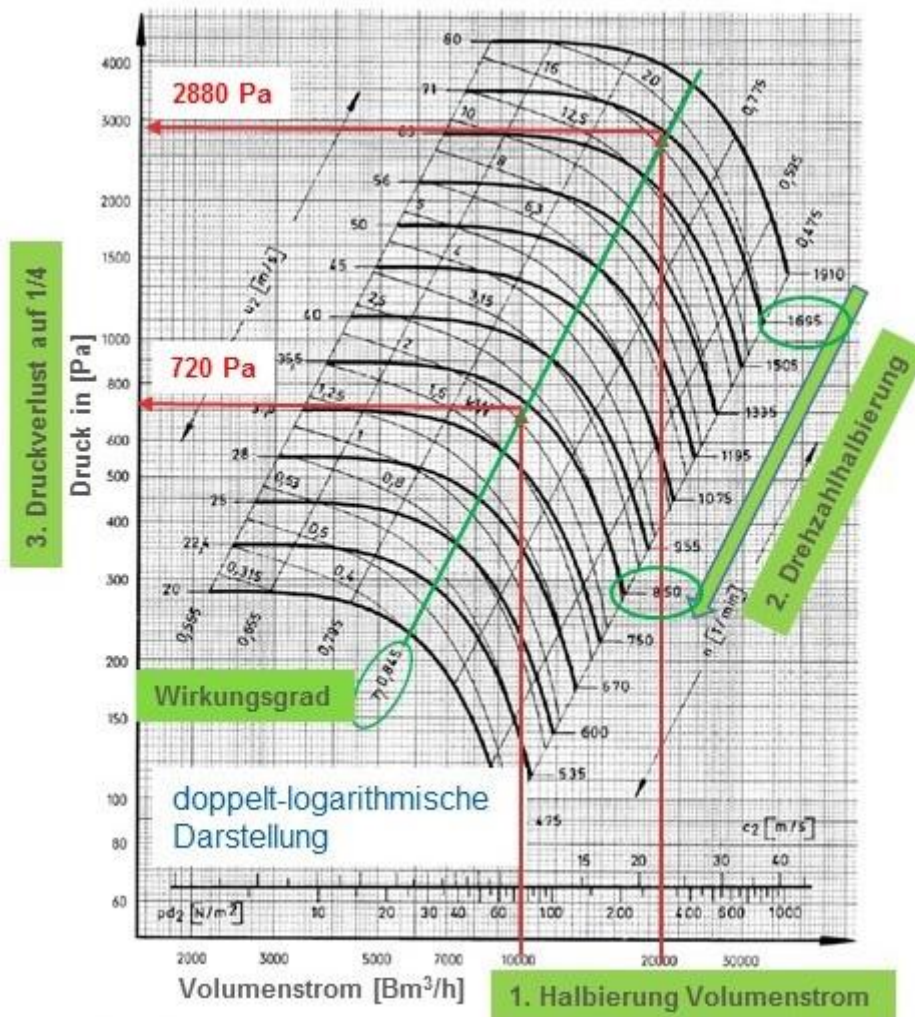
Die zentrale Gebläseeinheit soll aus einer Kombination von Radial- und Drehkolben-gebläsen bestehen. Hierbei sollen sich die grundsätzlich unterschiedlichen Charakteristiken dieser beiden Gebläsetypen zunutze gemacht werden.

Zur Verdeutlichung der Auswahlkriterien soll im Folgenden noch einmal kurz auf die wesentlichen Unterschiede eingegangen werden.

### **2.3.1 Grundlagen und verschiedene Gebläse-Charakteristiken**

Radialgebläse werden heutzutage üblicherweise als (dezentrale) Brennluftgebläse für Industrieöfen verwendet. Dies ist zum einen auf ihre relative simple und damit kostengünstige Bauform zurückzuführen, zum anderen aber auch auf die Charakteristik ihrer Kennlinien. Diese weisen für eine konstante Gebläsedrehzahl üblicherweise einen mehr oder weniger breiten Bereich mit einem flachen Verlauf auf, bzw. mit einer sehr geringen Abhängigkeit des erzeugten Drucks vom geförderten Volumenstrom, vgl. **Bild 3**. Dies bedeutet für den Einsatz als Brennluftgebläse, dass bei mäßig reduzierter Brennluftabnahme des Ofens der vom Gebläse aufgebaute Brennluftdruck nur gering beeinflusst wird. Dies ist vorteilhaft für die Gemischbildung innerhalb der Brenner, da so zum einen die Gefahr einer Verschiebung des Mischungsverhältnisses von Gas und Luft minimiert wird und zum anderen die Brenner, die sich in Betrieb befinden, immer mit annähernd gleichen Vordrücken beaufschlagt werden und somit immer nahe an ihrem Auslegungspunkt betrieben werden. Verringert sich die Brennluftabnahme des Ofens jedoch über einen bestimmten Punkt hinaus, muss ein Teil-Luftvolumenstrom abgeblasen werden, will man den undefinierten Zustand des „Gebläsepumpens“ verhindern.





**Bild 11:** Kennlinienfeld eines typischen Radialgebläses

Eine Reduzierung des geförderten Volumenstroms durch eine Reduzierung der Gebläsedrehzahl ist hingegen nicht möglich, da der geförderte Luftvolumenstrom (bei gleichbleibendem Wirkungsgrad) in etwa proportional zur Gebläsedrehzahl zu- und abnimmt (siehe **Gleichung 2**), während der erzeugte Luftdruck in einem quadratischen Zusammenhang mit der Gebläsedrehzahl (siehe **Gleichung 1**) steht.

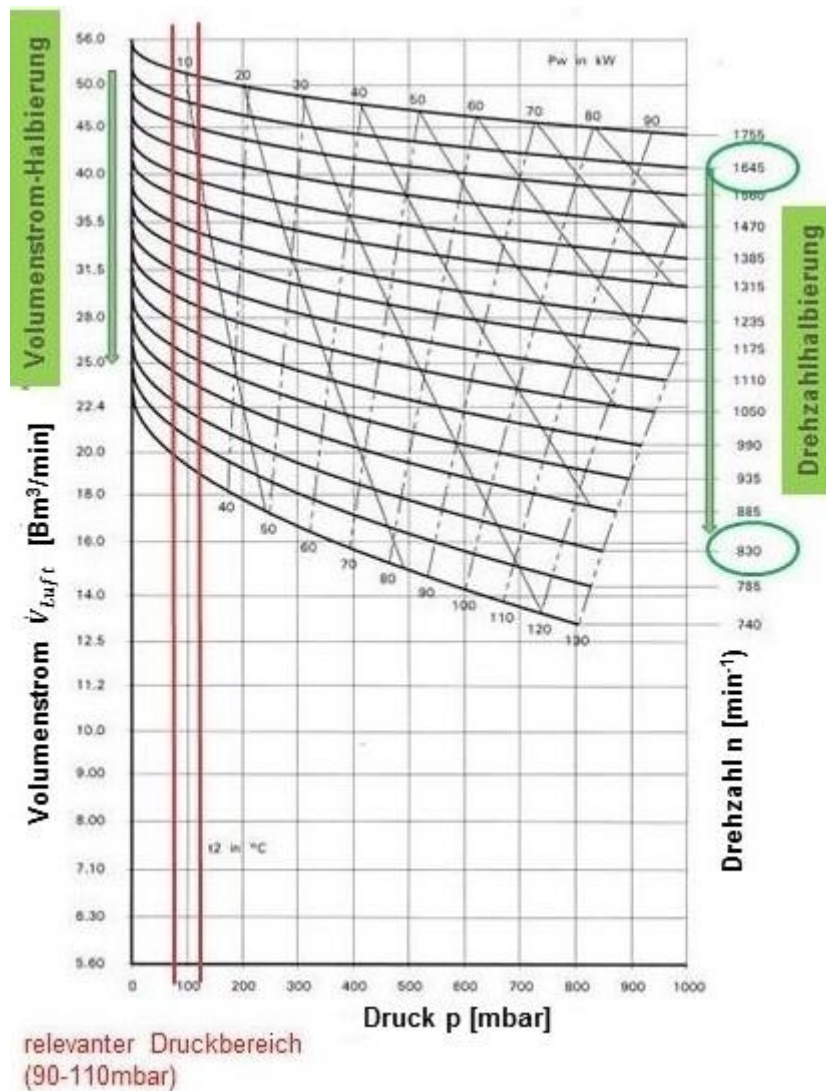
So würde beispielsweise die Halbierung des Luftvolumenstroms eine Halbierung der Gebläsedrehzahl erforderlich machen, was jedoch zwangsweise auch zu einer Viertelung des erreichbaren Drucks führen würde.

Da bei den meisten Industrieöfen eine Reduzierung der Beheizungsleistung durch das temporäre Abschalten einzelner Brenner realisiert wird, reduziert sich hierdurch zwar entsprechend der Brennluftbedarf, die Anforderung an einen konstanten Brennluftvordruck bleiben dabei aber durch die weiterhin in Betrieb befindlichen Brenner

unverändert bestehen. Eine bedarfsgerechte Anpassung der vom Gebläse geförderten Brennluftmenge auf Basis von Drehzahlvariationen ist damit nicht möglich.

Grundsätzlich anders verhalten sich Drehkolbengebläse. Drehkolbengebläse (o.a. Rootsgebläse) sind Zwangsförderer, ähnlich wie Kolbenpumpen. Bei einer Umdrehung der Kolben wird ein definiertes Volumen gefördert, was zwangsläufig bedeutet, dass eine Verdoppelung der Drehzahl bei gleichbleibender Druckerhöhung annähernd auch zu einer Verdoppelung des Volumenstroms führt. In **Bild 12** ist beispielhaft das Kennlinienfeld eines Drehkolbengebläses dargestellt. Soll bei einem solchen Gebläse der geförderte Volumenstrom halbiert werden, kann dies durch eine Halbierung der Drehzahl erreicht werden, im Gegensatz zu Radialgebläsen jedoch ohne eine zwangsläufige Reduzierung der erreichbaren maximalen Druckerhöhung. Hier kann weiterhin bei jeder (zulässigen) Drehzahl, jede geforderte Druckerhöhung im hier relevanten Bereich erreicht werden.

Volumenstromänderungen bei konstantem Gegendruck mittels Drehzahlvariation sind bei Drehkolbengebläsen also problemlos möglich, was auf die für Zwangsförderer typische Charakteristik zurückzuführen ist. Diese Charakteristik hat aber umgekehrt auch zur Folge, dass Änderungen am Strömungswiderstand, in der den geförderten Volumenstrom abnehmenden Anlagen, zu erheblichen Druckschwankungen führt, da der vom Gebläse geförderte Volumenstrom (zwangsweise) konstant bleibt, solange die Gebläsedrehzahl nicht angepasst wird. Bei Einsatz eines solchen Gebläsetyps als Brennluftgebläse muss, wenn einzelne Brenner des zu versorgenden Ofens abgeschaltet werden, eine Drehzahlanpassung erfolgen. Der Brennluftvordruck würde sonst entsprechend ansteigen, was bis zum Versagen / Zerstören des schwächsten Bauteiles in der Anlage führen könnte. Umgekehrt würde der Druck, ohne eine entsprechende Drehzahlanpassungen umgehend einbrechen, sobald zusätzliche Brenner zugeschaltet werden und deren Brennluftventile öffnen.



**Bild 12:** Kennlinienfeld eines typischen Rootskolbengebläses (Achtung: Ordinate und Abszisse typischerweise vertauscht gegenüber entsprechenden Diagrammen von Radialgebläsen)

## 2.3.2 Auswahl der Regel- und Grundlastgebläse

### 2.3.2.1 Konzept und zusätzliche Randbedingungen

Auf den in Kapitel 2.3.1 dargestellten unterschiedlichen Charakteristiken von Radial- und Drehkolbengebläsen basiert der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verfolgte Ansatz, diese beiden Gebläsetypen zu einer Gebläseeinheit zu kombinieren, um sie für die zentrale Brennluftversorgung von Industrieöfen zu nutzen.

Radialgebläse eignen sich dabei, aufgrund der überproportionalen Abhängigkeit der erreichbaren Druckerhöhung von der Gebläsedrehzahl, nicht als Regelgebläse. Die

für diese Gebläse typische geringe Abhängigkeit der erzeugten Druckerhöhung vom geförderten Volumenstrom (bei gleichbleibender Drehzahl) eignen sich sehr gut als Grundlastgebläse, mit konstanter Drehzahl.

Drehkolbengebläse hingegen sind sehr gut als Regelgebläse einsetzbar. Durch ihre direkte Abhängigkeit des Fördervolumens von der Drehzahl, können Sie an jede geänderte Volumenstromanforderung der Anlage angepasst werden. Ihre typische „Zwangsförderer“-Charakteristik macht jedoch kontinuierliche Anpassungen der Drehzahl an sich ändernde Volumenstromanforderungen auch zwingend erforderlich, weshalb Drehkolbengebläse als Grundlastgebläse nicht geeignet sind.

**Die Entwicklung der zentralen Gebläseeinheit fokussierte sich daher auf die Kombination eines Drehkolbengebläses als Regelgebläse, in Kombination mit einem oder mehreren Radialgebläsen als Grundlastgebläse. Besteht eine solche Kombination aus mehreren Grundlastgebläsen, so können diese kaskadenartig und bedarfsgerecht zugeschaltet werden.**

Im Rahmen der beispielhaften Entwicklung einer solchen Gebläseeinheit wurden verschiedenste Kombinationen aus unterschiedlichen Radial- und Drehkolbengebläsen zu einer solchen Einheit vereinigt und deren Betrieb auf Basis der messtechnisch erfassten Betriebsdaten realer Industrieöfen (s. Kapitel 2.2) simuliert. Genutzt wurde hierfür das eigens entwickelte und in Kapitel 2.1 beschriebene Simulationstool. Bei der Auswahl der untersuchten Gebläse(-kombinationen) wurden auch diverse individuelle Rahmenbedingungen berücksichtigt, wie beispielsweise die Baugröße der aktuell (dezentral) verwendeten Gebläsegrößen und –leistungen, um grundsätzlich auch die Möglichkeit bewerten zu können, ob die Gebläse bestehender Einzelofenanlagen zu zentralen Gebläseeinheiten zusammengefasst werden können, wenn Sie zusätzlich mit einem Drehkolbengebläse als Regelgebläse kombiniert werden. Für die beispielhafte Entwicklung einer solchen Gebläseeinheit wurden daher final die in **Tabelle 2** aufgeführten Gebläse gewählt.

### **2.3.2.2 Einfluss des Regelbereichs des Regelgebläses auf Gebläseauswahl**

Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte Simulationstool ist in der Lage, die automatische Deckung eines angeforderten Gesamtbrennluftbedarfs von bis zu vier Öfen durch ebenfalls bis zu vier Gebläse zu decken. Der Gesamtbrenn-

Luftbedarf basiert dabei stets auf den messtechnisch erfassten realen Brennluftverbräuchen der untersuchten vier Industrieöfen (s. Kapitel **1.3**). Variationen werden ausschließlich durch zeitliche Verschiebungen der realen Einzelbrennluftvolumenströme der vier Öfen zueinander erzeugt, was direkt im Simulationstool erfolgen kann. Zur Bewertung einzelner Konfigurationen soll sich dabei im weiteren Verlauf auf die bereits definierten Settings „real“, „max.“ und „homogen“ konzentriert werden, vgl. Kapitel **2.2**.

Die dem Tool zur Verfügung stehenden Gebläse bestehen aus einem Regelgebläse und bis zu drei Grundlastgebläsen. Sie werden primär durch die Anzahl der Grundlastgebläse sowie durch die Vorgabe ihrer Nennvolumenströme definiert. Darüber hinaus können noch Nebenbedingungen definiert werden, welche beispielsweise die vollständige Berücksichtigung der jeweiligen Kennlinien sowie individuelle Einschränkungen in den jeweiligen Zuschaltbedingungen ermöglichen, worauf allerdings erst später eingegangen werden soll. Aspekte der Regeldynamik sowie gasdynamische Effekte (Strömungsverhalten im Rohrleitungssystem) können mit dem eigenentwickelten Tool hingegen nicht oder nur sehr bedingt berücksichtigt werden. Diese Prozessparameter wurden daher separat untersucht, auch unter Zuhilfenahme kommerzieller Simulationstools. Die zugehörigen Ergebnisse werden in Kap. **2.4.2** und Kap. **2.5** diskutiert.

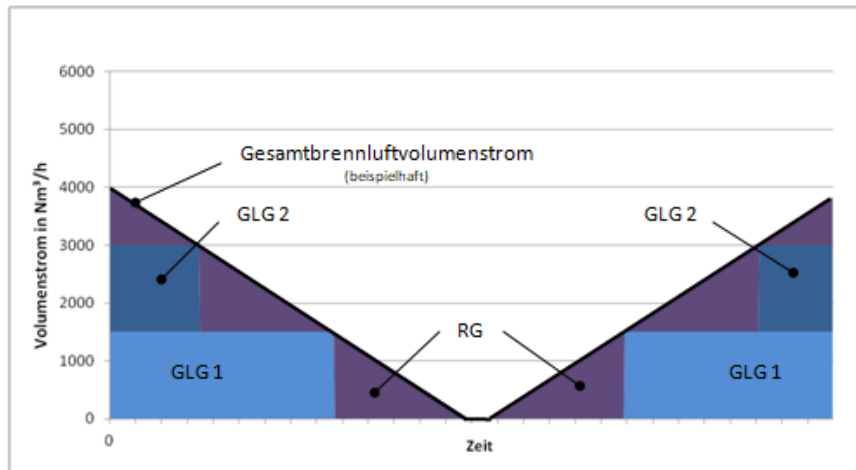
In den Voruntersuchungen der bestmöglichen Gebläsekombination zu einer zentralen Gebläseeinheit wurden im Wesentlichen folgende Zuschaltbedingungen im Simulationstool für die verwendeten Gebläse hinterlegt:

- Regelgebläse: deckt angeforderten Volumenstrom innerhalb seines Betriebsbereiches durch Drehzahlanpassung
- Grundlastgebläse 1-3: Zugeschaltet sobald Regelgebläse mit seinem max. Fördervolumenstrom den (Rest-) Gesamt-Brennluftbedarf nicht alleine decken kann.

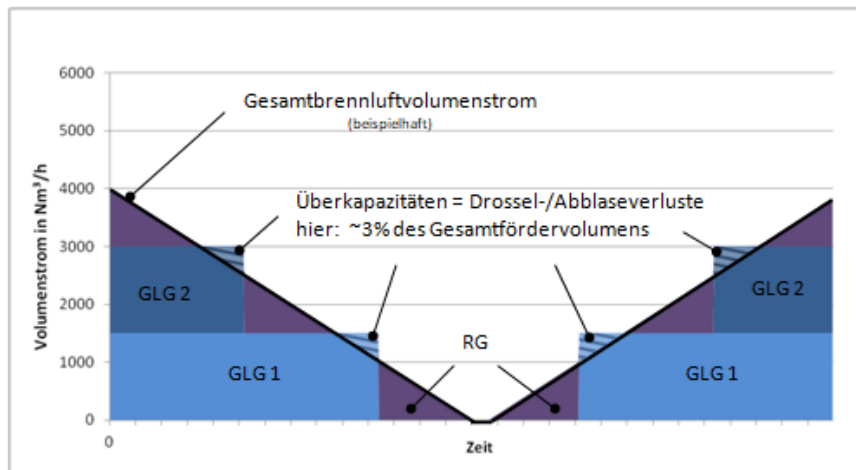
Die durchgeführten Untersuchungen führten zu wichtigen Erkenntnissen, welche anhand einfacher Beispiele erläutert werden sollen. So sollte beispielsweise der maximale Fördervolumenstrom des Regelgebläses mindestens so groß sein wie der Nennfördervolumenstrom des leistungstärksten Grundlastgebläses. Ist der maximale Fördervolumenstrom des Regelgebläses hingegen kleiner, müssen die unregulierten Grundlastgebläse, beispielsweise bei fallenden Gesamtvolumenströmen, länger

in Betrieb bleiben als eigentlich erforderlich bevor das Regelgebläse wieder übernehmen kann. Dies kann zu vermeidbaren Abblase- oder Drosselverlusten führen, s.

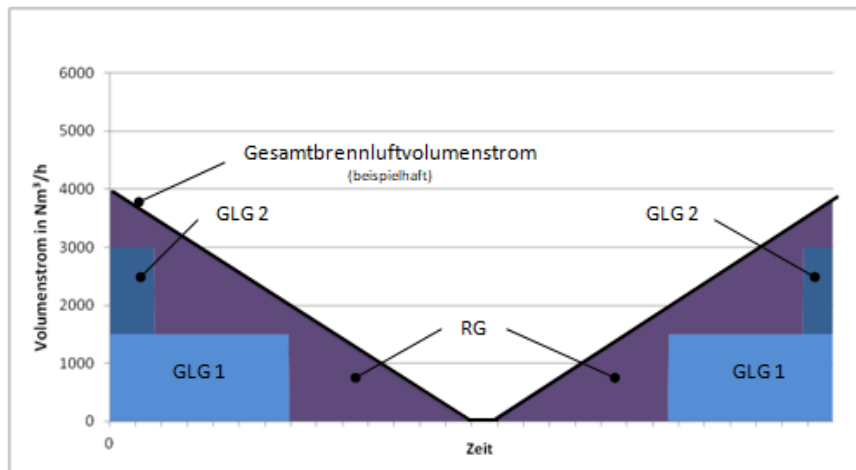
**Bild 13.**



Je Grundlastgebläse: **1.500 Nm<sup>3</sup>/h** Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: **1.500 Nm<sup>3</sup>/h** max. Fördevolumenstrom



Je Grundlastgebläse: **1.500 Nm<sup>3</sup>/h** Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: **1.000 Nm<sup>3</sup>/h** max. Fördevolumenstrom



Je Grundlastgebläse: **1.500 Nm<sup>3</sup>/h** Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: **2.000 Nm<sup>3</sup>/h** max. Fördevolumenstrom

**Bild 13:** Verhalten einer zentralen Brennluftgebläseeinheit bei unterschiedlichen Fördevolumenströmen des Regelgebläses

Da Drehkolbengebläse aufgrund unvermeidbarer innerer Undichtigkeiten mit abnehmender Drehzahl und/oder steigendem Gegendruck an Effizienz verlieren, ist ihr minimaler Fördervolumenstrom aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt. Ein weiteres wichtiges Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen war daher der Zusammenhang zwischen Nennvolumenstrom der Grundlastgebläse und maximalem sowie minimalem Fördervolumenstrom des Regelgebläses, s. **Bild 14**.

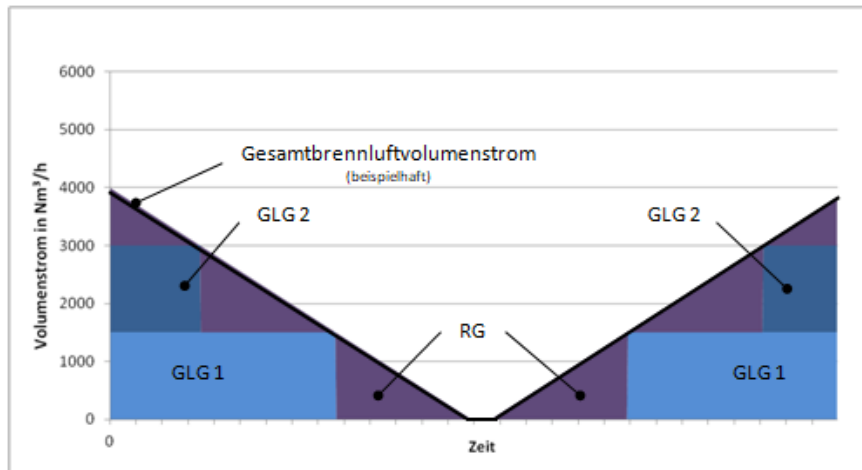
Die Begrenzung des minimalen Fördervolumenstroms führt zu einer Effizienzverschlechterung der gesamten Gebläseeinheit, da bei sehr geringen Gesamtvolumenströmen, welche durch das Regelgebläse gedeckt werden müssen, ein zu hoher Volumenstrom erzeugt wird (**Bild 14**, Mitte). Diese Überkapazitäten können erheblich werden, je nach Leistungsdaten der verwendeten Gebläse. Durch eine geschickte Wahl des Regelgebläses bzw. dessen (Grenz-) Daten lassen sich diese Überkapazitäten aber auf ein Minimum reduzieren. Hierfür muss gelten, dass **der maximale Fördervolumenstrom des Regelgebläses mindestens so hoch sein muss, wie die Summe aus Nennvolumenstrom des leistungsfähigsten Grundlastgebläses und dem minimalen Fördervolumenstrom des Regelgebläses (Bild 14, unten)**.

Unter den so ermittelten Randbedingungen und der o.g. Vorgabe, dass möglichst die bestehenden (Einzel-) Brennluftgebläse weiterhin als Grundlastgebläse der neuen zentralen Gebläseeinheit weiterverwendet werden sollen, fand die Gebläseauswahl für die beispielhafte Entwicklung einer solchen zentralen Gebläseeinheit im Rahmen dieses Forschungsvorhabens statt.

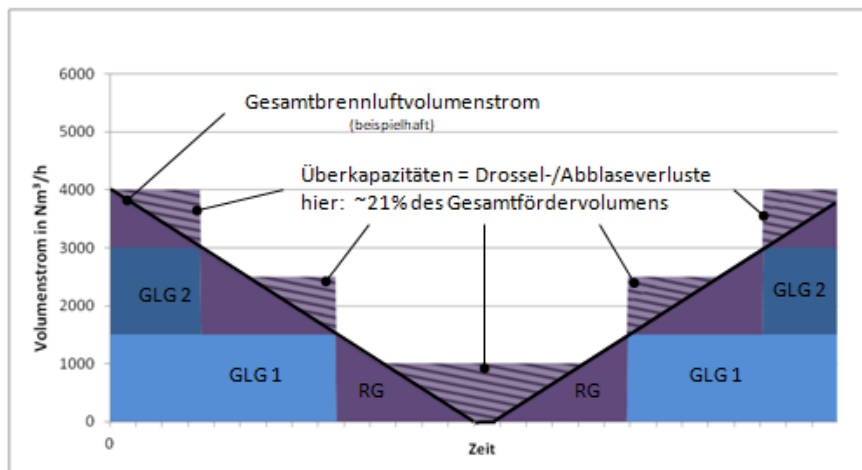
Da die im beispielhaft untersuchten Betrieb vorhandenen Brennluftgebläse jeweils etwa eine Nennförderleistung von ca. 1.500 m<sup>3</sup>/h i.N. aufwiesen, wurde ein Drehkolbengebläse aus dem J&H-Gebläsetechnik-Portfolio gewählt, dessen maximaler Fördervolumenstrom mindestens 1.500 m<sup>3</sup>/h i.N. größer ist als sein minimaler Fördervolumenstrom.

Für die beispielhafte Entwicklung einer solchen Gebläseeinheit wurden daher final die in **Tabelle 2** aufgeführten Gebläse gewählt.

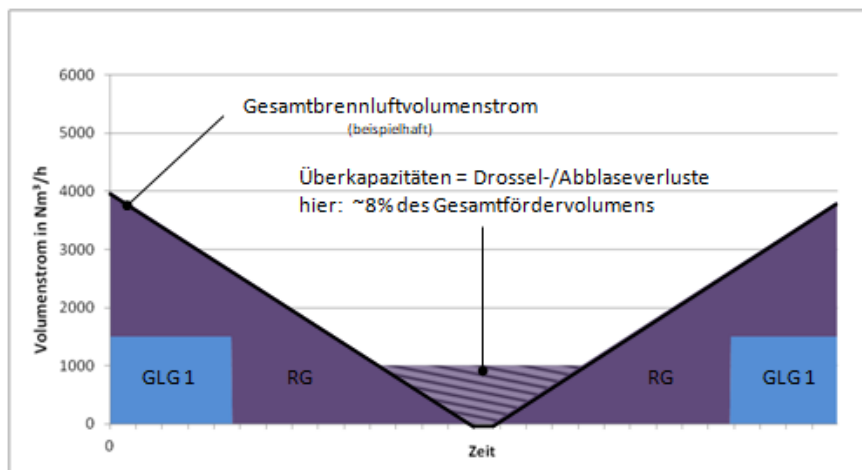




Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: 0 – 1.500 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom



Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: 1.000 – 1.500 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom



Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördevolumenstrom  
 Regelgebläse: 1.000 – 2.650 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom

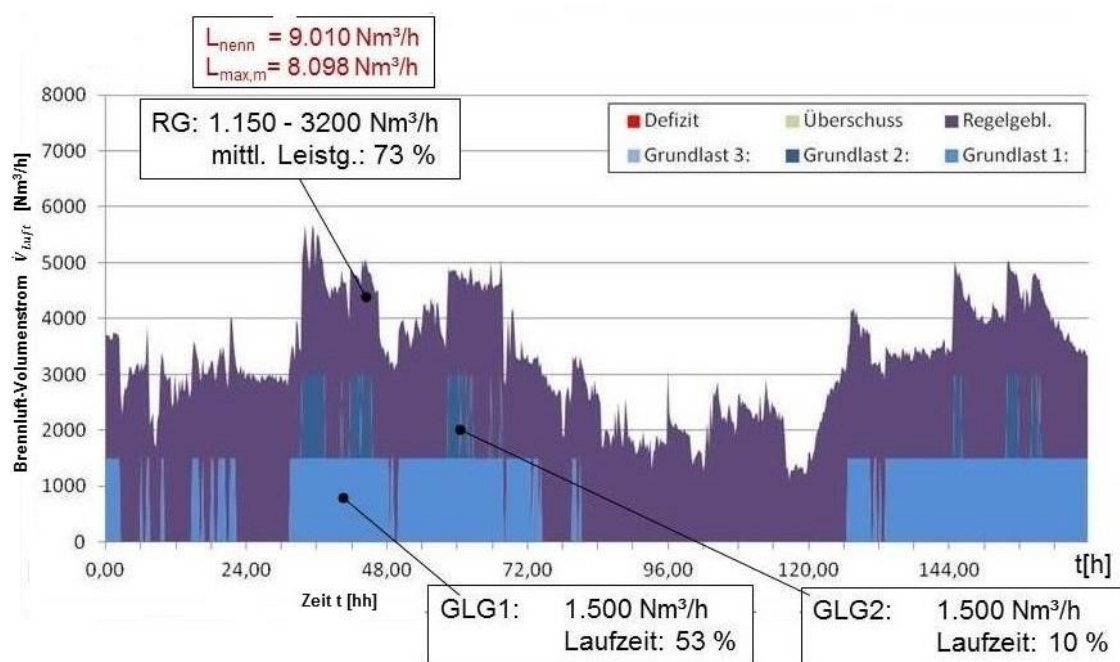
**Bild 14:** Zusammenhang zwischen Nennvolumenstrom der Grundlastgebläse und max- sowie minimalem Fördervolumenstrom des Regelgebläses

**Tabelle 2:** Ausgewählte Gebläse einer zentralen Brennluftversorgung der Ofen-  
gruppe

Gebläseart	Anzahl	Typ	Nennvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h i.N.]
<b>Grundlastgebläse (GLG)</b>	3	Radialgebläse (z.B. CIMME GBJ F08040)	1.500
<b>Regelgebläse (RG)</b>	1	Rootskolbengebläse (z.B. J&H RV52/53)	1.150 – 3.200

### 2.3.3 Überprüfung der Gebläseauswahl

Die Überprüfung der so definierten zentralen Gebläseeinheit erfolgte, wie bereits be-  
schrieben, mithilfe der messtechnisch erfassten, realen Betriebsdaten der vier unter-  
suchten Industrieöfen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in **Bild 15** darge-  
stellt.



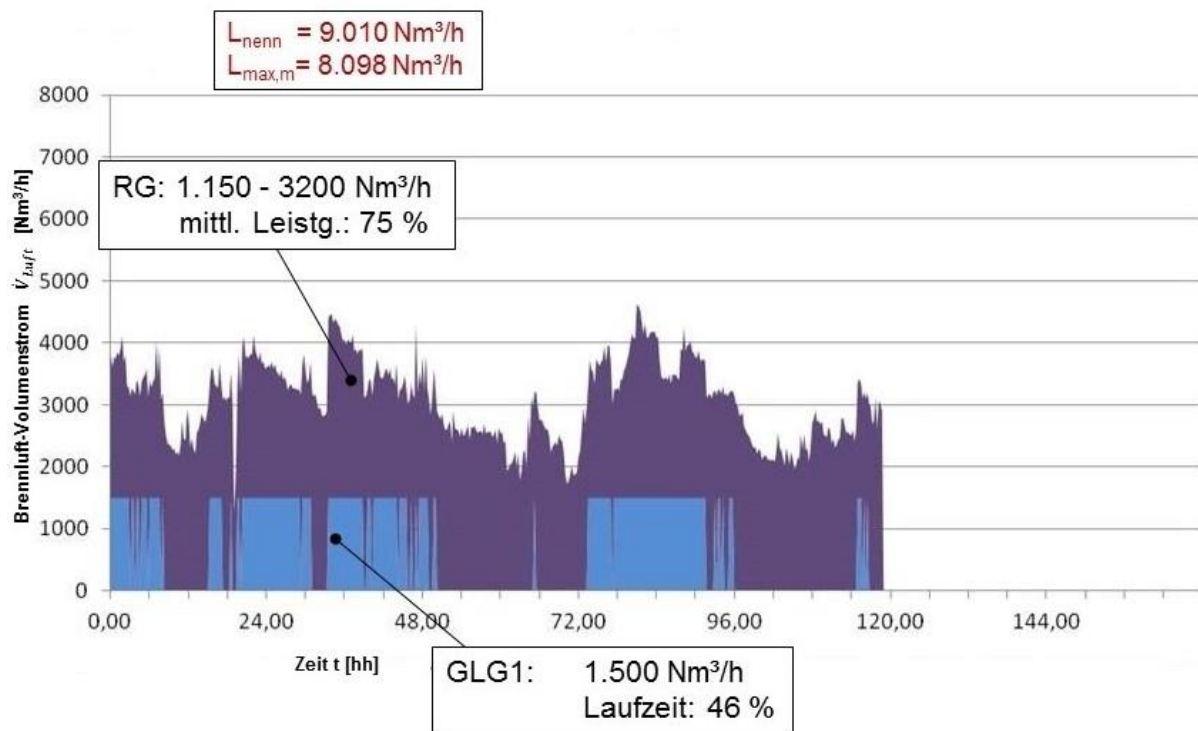
**Bild 15:** Grundlast- und Regelgebläse-Auslastungen für die realen Betriebs-  
messdaten der vier Öfen; Setting „real“

Die Simulation der zentralen Brennluftversorgung im oben definierten Setting „real“, was der tatsächlichen Anforderung im Messzeitraum entsprochen hätte zeigt, dass in dieser Konfiguration nur zwei Grundlastgebläse und ein Regelgebläse erforderlich gewesen wären, um in jeder Situation den Gesamtbrennluftbedarf decken zu können. Das zweite Grundlastgebläse (GLG2) kommt dabei nur relativ kurzzeitig, bei kumulierten Brennluft-Maxima, zum Einsatz. Das erste Grundlastgebläse (GLG1) ist zu etwa 50% ausgelastet. Ein Großteil des Brennluftbedarfs während der hier untersuchten einwöchigen Erfassungszeit könnte ausschließlich durch das Regelgebläse (RG) abgedeckt werden. Theoretisch mögliche Abblase- oder Drosselverluste durch Überkapazitäten, wie in **Bild 14** unten dargestellt, treten nicht auf.

Zum Vergleich: Im realen Betrieb waren Brennluftgebläse mit einem Gesamtförder-  
volumen von mehr als 9.000 m<sup>3</sup>/h i.N. zu 100 % des Betrachtungszeitraums in Betrieb.

**Bild 16** zeigt die entsprechenden Simulationsergebnisse der neuen zentralen Gebläseeinheit unter Verwendung des Settings „homogen“, was der Situation eines möglichst gleichmäßigen Verlaufs des Gesamtbrennluftbedarfs entspricht. Der gesamte Brennluftbedarf der Ofengruppe könnte hier sogar durch ein einziges Grundlastgebläse und ein Regelgebläse abgedeckt werden. Ein Abblasen von überschüssiger Brennluft ist nicht erforderlich.

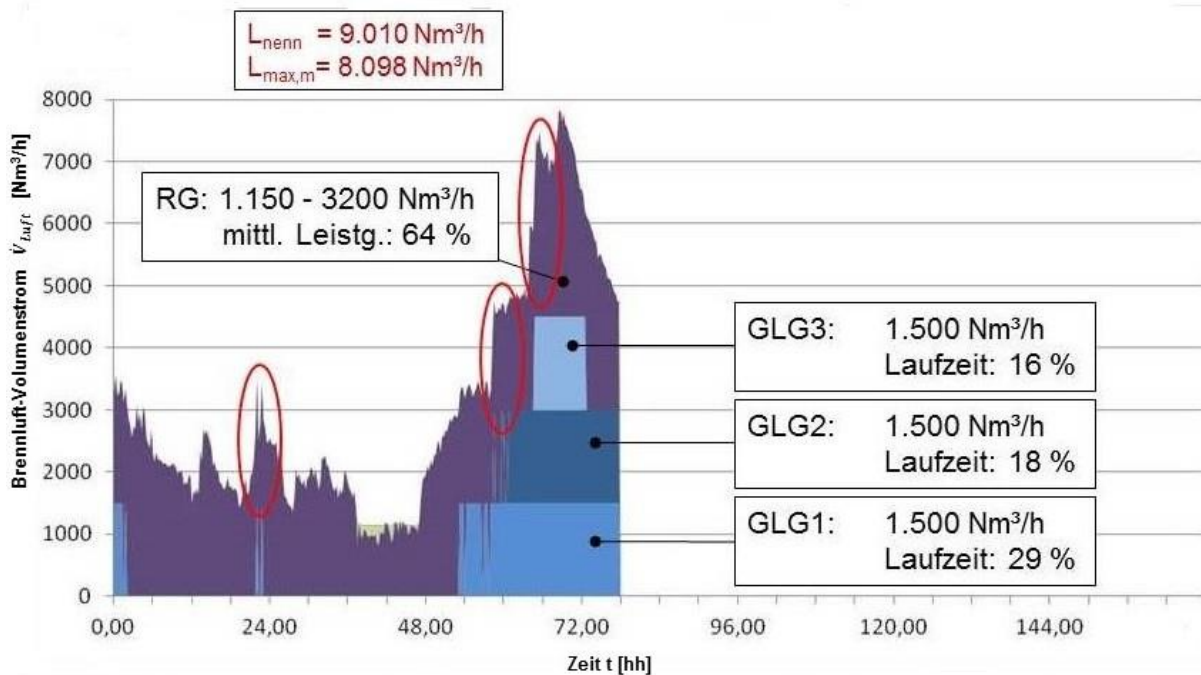
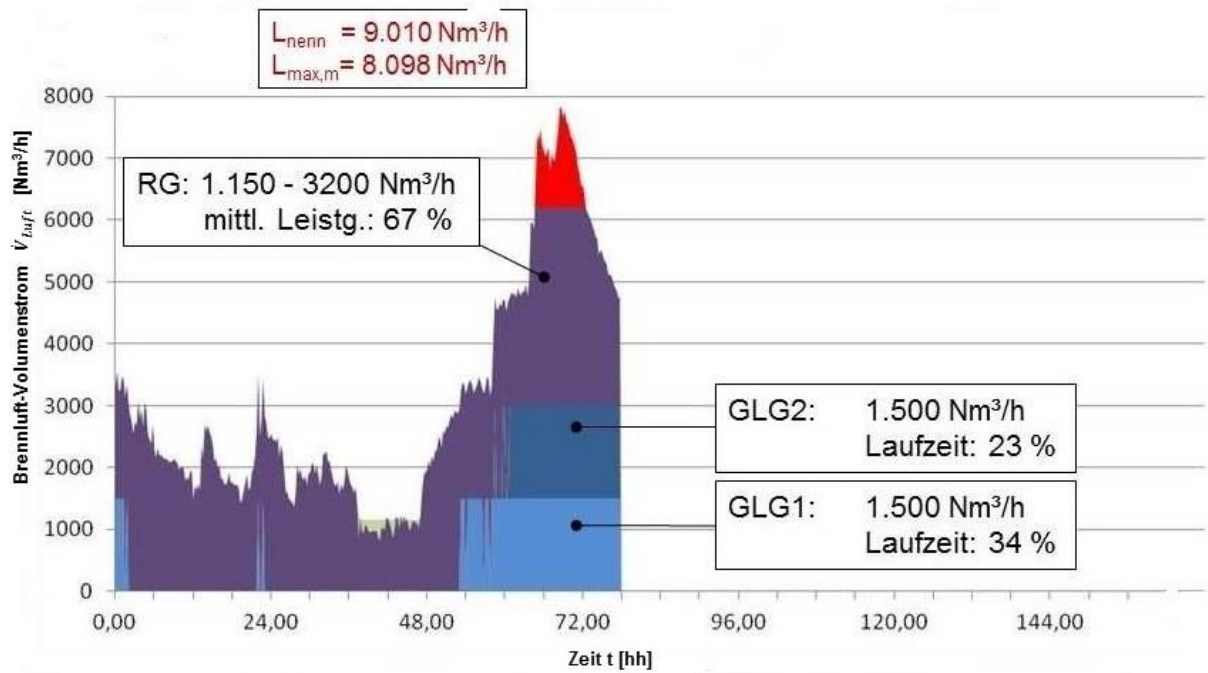
Das betrachtete Szenario ist natürlich theoretisch und stellt, wie oben beschrieben, nur eine der beiden Grenzsituationen von möglichen Anforderungen dar. Im Betrieb würde eine solche Situation nur entstehen, wenn die Einsatzzeiten der vier Öfen nach Bedarf an Brennluft optimiert werden oder betriebsbedingt eine Desynchronisierung der Öfen stattfindet (s. Kapitel **2.2**).



**Bild 16:** Grundlast- und Regelgebläse-Auslastung bei minimalem Brennluftbedarf der 4 Öfen; Setting „homogen“

Die zweite Grenzsituation entspricht einer leistungsbezogenen Synchronisierung der Öfen in der betrachteten Ofengruppe. Diese Worst-case-Betriebsituation (Setting „max“) für ein Maximum des Gesamtbrennluftvolumenstroms wird in **Bild 17** gezeigt.

In der hier simulierte Betriebsituation reichen zwei der definierten Grundlastgebläse in Kombination mit einem Regelgebläse nicht mehr aus (**Bild 17**, oben). Das Simulationsmodell weist hier korrekterweise ein Förderdefizit aus, trotz Zuschaltung aller verfügbaren Gebläse. Erst durch die zusätzliche Integration eines dritten Grundlastgebläses gleicher Leistung kann auch während des Maximums des Gesamtvolumenstroms der Bedarf vollständig durch die zentrale Gebläseeinheit gedeckt werden (**Bild 17**, unten). Wenn der Ofenbetreiber vorgibt, stets die maximal mögliche Brennluftanforderung als maximale Förderleistung vorzuhalten, ist demnach die gleiche Gebläseleistung zu installieren. Wird darauf verzichtet, so kann die installierte Gebläseleistung geringer ausfallen, Investitionskosten können gesenkt werden.



**Bild 17:** Grundlast- und Regelgebläse-Auslastung bei maximalem Brennluftbedarf der 4 Öfen, Setting: „max.“

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass Investitionskosten durch die Installation von zentralen Gebläseeinheiten anstatt dezentraler Einzelgebläse, nicht reduziert werden können. In den Simulationsergebnissen werden Überkapazitäten ausgewiesen, wenn der Gesamtbrennluftbedarf unter die minimale Förderleistung des Regelgebläses sinkt. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass diese unvermeidlichen Ver-

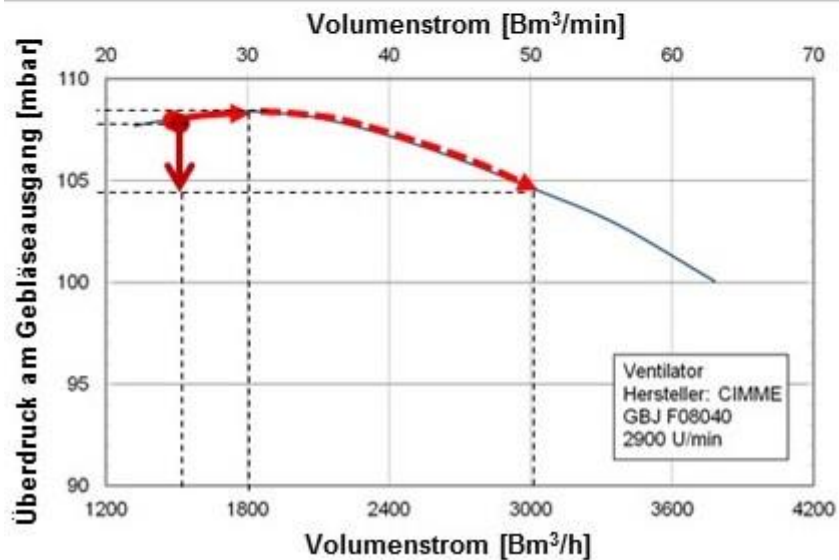
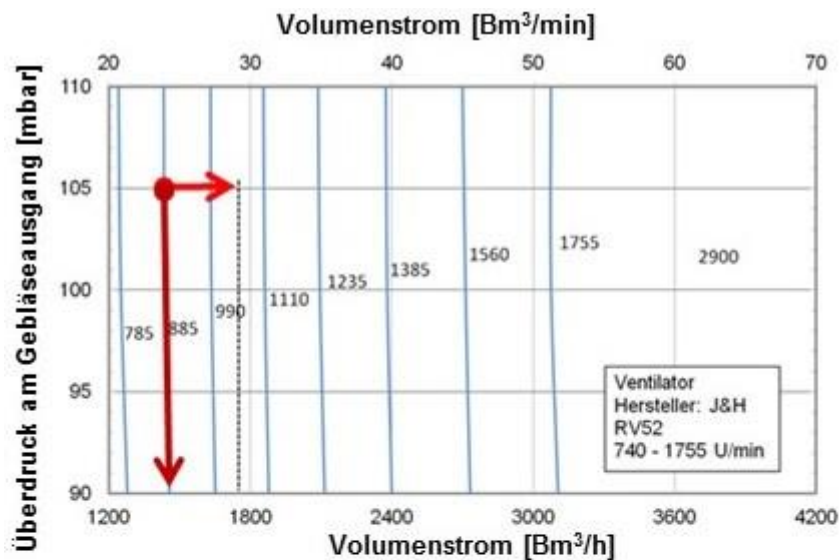
luste durch Überkapazitäten nur bei dem dargestellten Setting „max.“ aufgetreten sind, welches bewusst darauf abzielt, einen möglichst inhomogenen Verlauf des Gesamtbrennluftbedarfs abzubilden. Mit 0,4 % von der gesamten Fördermenge bleiben sie zudem vernachlässigbar gering.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit der gewählten Kombination von Einzelgebläsen zu einer zentralen Gebläseeinheit der Gesamtbrennluftbedarf der gewählten Öfen zu jeder Zeit gedeckt werden kann.

#### **2.3.4 Optimierung von Vordrucksicherung und Grundlastgebläsebetrieb**

Die in Kapitel 2.3.3 durchgeführten Simulationen zur Überprüfung der gewählten Gebläsekombination haben gezeigt, dass unter Umständen sehr kurzfristige Änderungen am Gesamtbrennluftbedarf auftreten können.

Aufgrund der relativ großen, rotierenden Massen in Drehkolbengebläsen und deren mechanischer Trägheit, ist davon auszugehen, dass sehr starke, abrupte Änderungen am Gesamtbrennluftbedarf die Reaktionsfähigkeit des Regelgebläses überfordern könnte. Hierbei ist vor allem das spontane Ansteigen des Gesamtbrennluftbedarfs kritisch solange noch keines der Grundlastgebläse in Betrieb ist, da hier ohne eine ebenso spontane Drehzahlkorrektur des Regelgebläses, der erzeugte Brennluftvordruck übergangslos zusammenbrechen würde, vgl. hierzu Kapitel 2.3.1 und **Bild 18**, oben.



**Bild 18:** Vordruckänderung in Abhängigkeit einer Volumenstromänderung, **oben: Regelgebläse**; **unten: Grundlastgebläse** (beispielhaft anhand von mögliche Gebläsetypen)

Eine abrupte Volumenstromzunahme um beispielsweise 300 Bm<sup>3</sup>/h, von 1.500 Bm<sup>3</sup>/h auf 1.800 Bm<sup>3</sup>/h, was in etwa der Zuschaltung eines einzigen 300 kW-Brenners entspricht, würde bei einem reinen Regelgebläsebetrieb, ohne verzögerungsfreie (!) Drehzahlkorrektur, zu einem nicht akzeptablen Brennluftvordruckeinbruch und damit zu einem erheblich reduzierten Brennluftumsatz über jeden der in Betrieb befindlichen einzelnen Brenner führen (s. **Bild 18**, oben).

Bei einem reinen Grundlastgebläsebetrieb hingegen, würde eine vergleichbare Veränderung im Gesamtbrennluftbedarf lediglich zu einer minimalen, vernachlässigba-

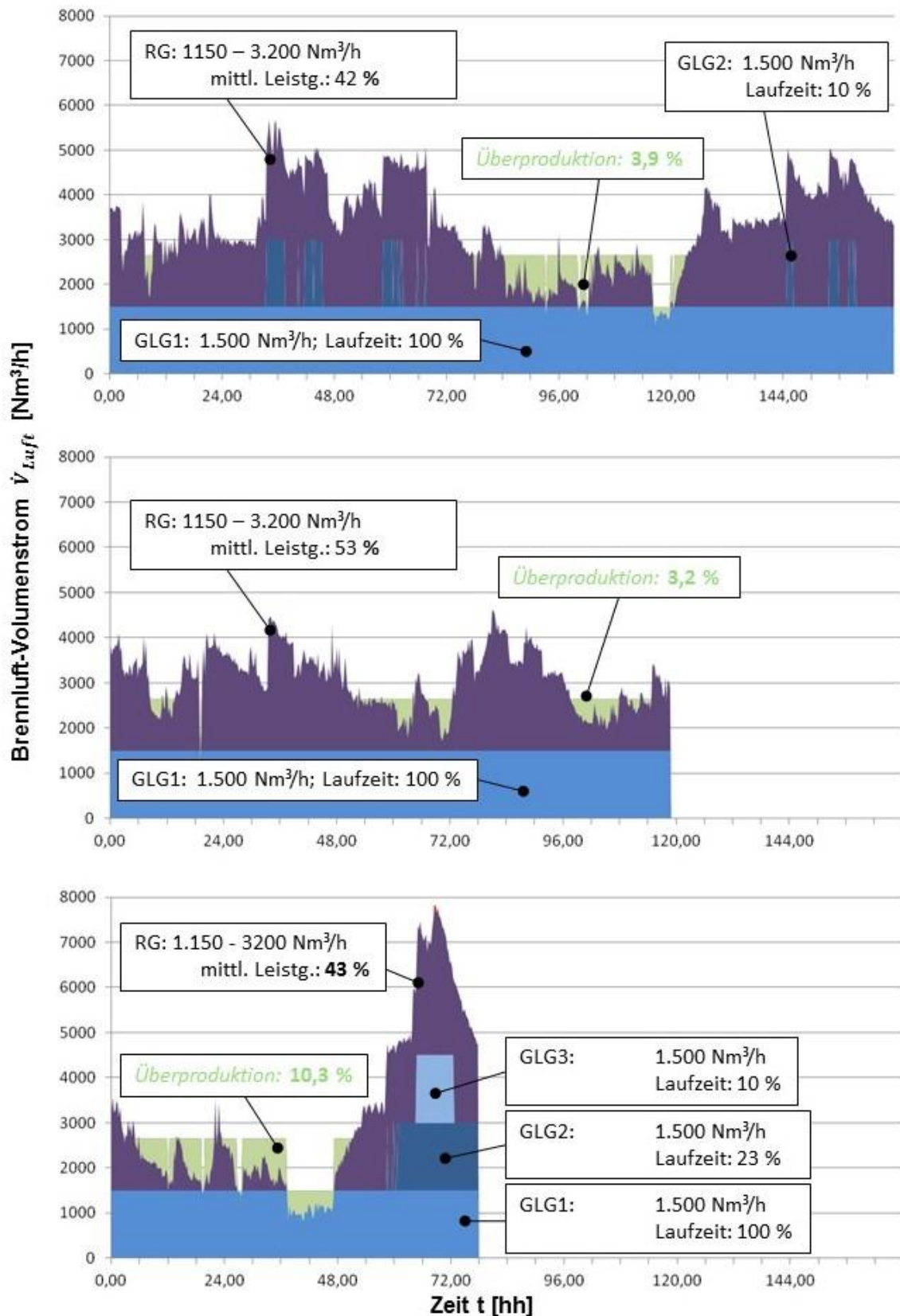
ren Veränderung des erzeugten Vordruckes und damit Umsatz über jeden einzelnen in Betrieb befindlichem Brenner führen (s. **Bild 18**, unten). Selbst eine Verdopplung des abgenommenen Brennluftvolumenstroms würde im beschriebenen Betriebsbereich lediglich zu Vordruckschwankungen von einigen wenigen Millibar führen.

**Um die Vorteile des „gutmütigen“ Förderverhaltens der Radialgebläse in allen Betriebssituationen der neuen, zentralen Gebläseeinheit nutzen zu können, müsste sich immer mindestens eins der Grundlastgebläse in Betrieb befinden.**

Um Vor- und mögliche Nachteile bewerten zu können, wurde auch diese Betriebsweise mit dem entwickelten Software-Tool simuliert. **Bild 19** zeigt die zugehörigen Ergebnisse, wieder anhand der drei vordefinierten Settings „real“, „homogen“ und „max.“.

Wie erwartet führt mindestens ein dauerhaft betriebenes Grundlastgebläse in Kombination mit einer vorgegebenen Mindestfördermenge des Regelgebläses bei sehr geringen Gesamtbrennluftbedarfen zu Überproduktionen bei der Brennluftförderung, welche durch Abblasen oder Drosseln der Grundlastgebläse zu entsprechenden energetischen Verlusten führen. Die überschüssige Luftmenge beläuft sich allerdings lediglich auf 3,2 % bzw. 3,9 % der Gesamtluftfördermenge bei den Settings „real“ und „homogen“ sowie auf 10,3 % beim Setting „max.“. Im Vergleich zu den eingesparten Überkapazitäten gegenüber einer herkömmlichen, dezentralen Brennluftversorgung, sind diese zusätzlichen Verluste so gering, dass die erwarteten Vorteile der Brennluftvordruckstabilisierung überwiegen.





**Bild 19:** Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte), „max.“ (unten) bei dauerhaft eingeschaltetem GLG 1

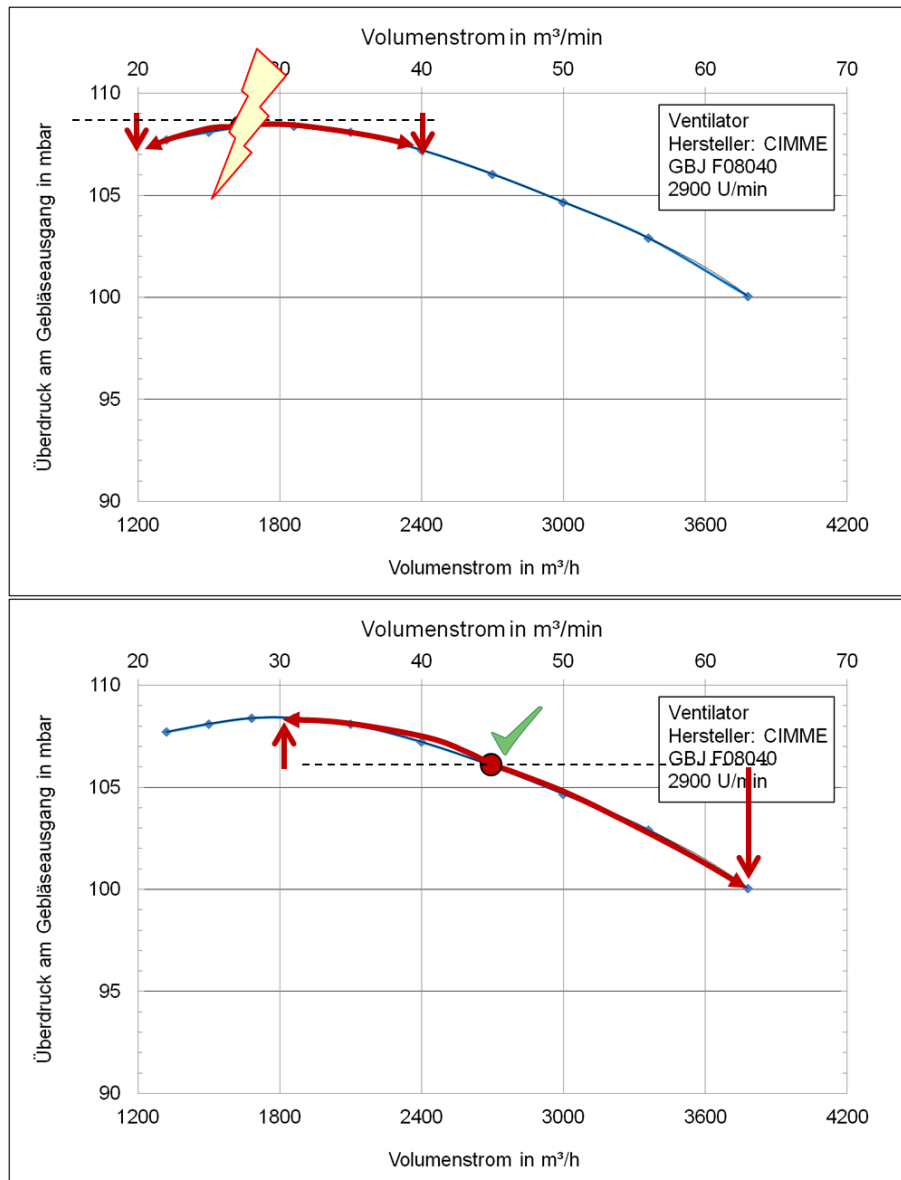
Der Ansatz mindestens eines, dauerhaft betriebenen Grundlastgebläses wird daher im vorliegenden Forschungsvorhaben weiterverfolgt. Die Ergebnisse einer detaillierten Untersuchung des Zusammenspiels der beiden Gebläsetypen Radial- und Drehkolbengebläse in Bezug auf die angestrebte Vordruckstabilisierung mithilfe eines eigens hierfür installierten Prüfstands sind in Kapitel **2.5** beschrieben.

### **2.3.5 Mögliche Regelungskonzepte**

Die Entwicklung detaillierter Regelungskonzepte für die neue zentrale Gebläseeinheit sollen zwar nicht Kernbestandteil des vorliegenden Forschungsvorhabens sein, in Bezug auf mögliche Folgeentwicklungen und/oder eine spätere Umsetzung an bestehenden Industrieanlagen sollen hier jedoch trotzdem erste Ansätze für solche Konzepte dargestellt werden.

Mit Bezug auf die kaskadenartige Zu- und Abschaltung der Grundlastgebläse 1 bis n (s. Kapitel **2.3.2.1**) ergibt sich ein offensichtlicher regelungstechnischer Ansatz. Sobald das Regelgebläse seine zulässige Maximal bzw. Mindestdrehzahl erreicht hat, ist das nächste Grundlastgebläse zu- bzw. abzuschalten. Aufgrund der erforderlichen An- und Ablaufzeiten der Grundlastgebläse, werden hier entsprechende Vorlaufzeiten zu berücksichtigen sein, bzw. Abstände der ausschlaggebenden Schaltdrehzahlen von den zugehörigen Grenzdrehzahlen.

Die Regelung des Regelgebläses hingegen erfordert eine weitere eindeutige Stellgröße. Hier bietet sich der Brennluftvordruck in der zentralen Verteilleitung an. Allerdings werden Radialgebläse, besonders bei einem Einsatz als Brennluftgebläse, üblicherweise in einem Bereich ihres Kennfeldes betrieben, der eine möglichst waagerechten Verlauf der zugehörigen Kennlinie aufweist, s. **Bild 20**, oben. Die an den hier untersuchten Ofenanlagen verwendeten Gebläse weisen ein lokales Maximum in ihrem Auslegungspunkt bei ca. 1.800 m<sup>3</sup>/h i.N. auf, was zur Folge hat, dass der erreichbare Brennluftvordruck (bei konstanter Gebläsedrehzahl) sowohl bei einer Reduzierung, als auch bei einer Steigerung der Brennluftabnahme fallen würde. Eine Korrektur der Brennluftförderleistung wäre damit auf Basis des Brennluftvordrucks in der zentralen Verteilleitung nicht möglich.



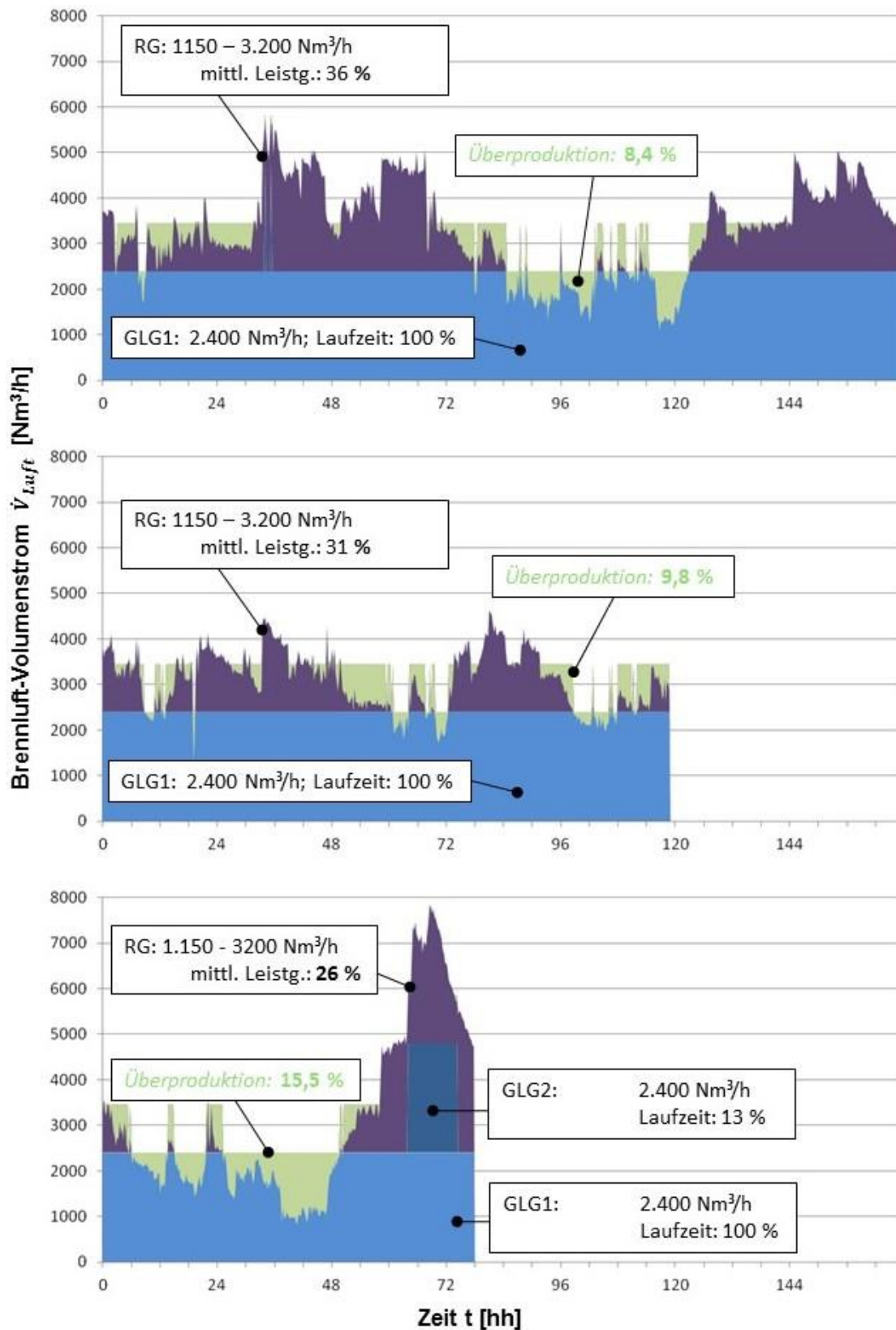
**Bild 20:** Druckänderungsverhalten von Radialgebläsen in Abhängigkeit von Volumenstromänderung, ausgehend von verschiedenen Nennbetriebspunkten

Würde man hingegen das Gebläse anstatt bei etwa 1.500 m³/h i.N. bei 2.400 m³/h i.N. betreiben, hätte eine Reduzierung der Volumenstromabnahme (ebenfalls bei konstanter Gebläsedrehzahl) eine Druckerhöhung und eine Erhöhung der Brennluftabnahme entsprechend eine Druckreduzierung zur Folge, s. **Bild 20**, unten. In diesem Fall ist eine Regelstrategie basierend auf der Regelung des Brennluftvordrucks in der gemeinsamen Verteilung möglich.

Es ergeben sich für die in Kapitel **2.3.2** definierte zentrale Gebläseeinheit bei einer Betriebspunktverschiebung der Grundlastgebläse von 1.500 Nm³/h auf 2.400 Nm³/h

die in **Bild 21** dargestellten Betriebsverläufe für die drei definierten Settings „real“, „homogen“ und „max.“. Erwartungsgemäß erhöhen sich die Überkapazitäten. Die gesamtenergetische Bewertung der beschriebenen Betriebspunktverschiebung erfolgt in Kapitel **2.6**.

Mögliche Wechselwirkungen zwischen Drehkolben- und Radialgebläsen an einem gemeinsamen Verteilnetz wurden hierbei noch nicht berücksichtigt. Sie werden in den folgenden Kapiteln **2.4.1** und **2.4.2** näher betrachtet.



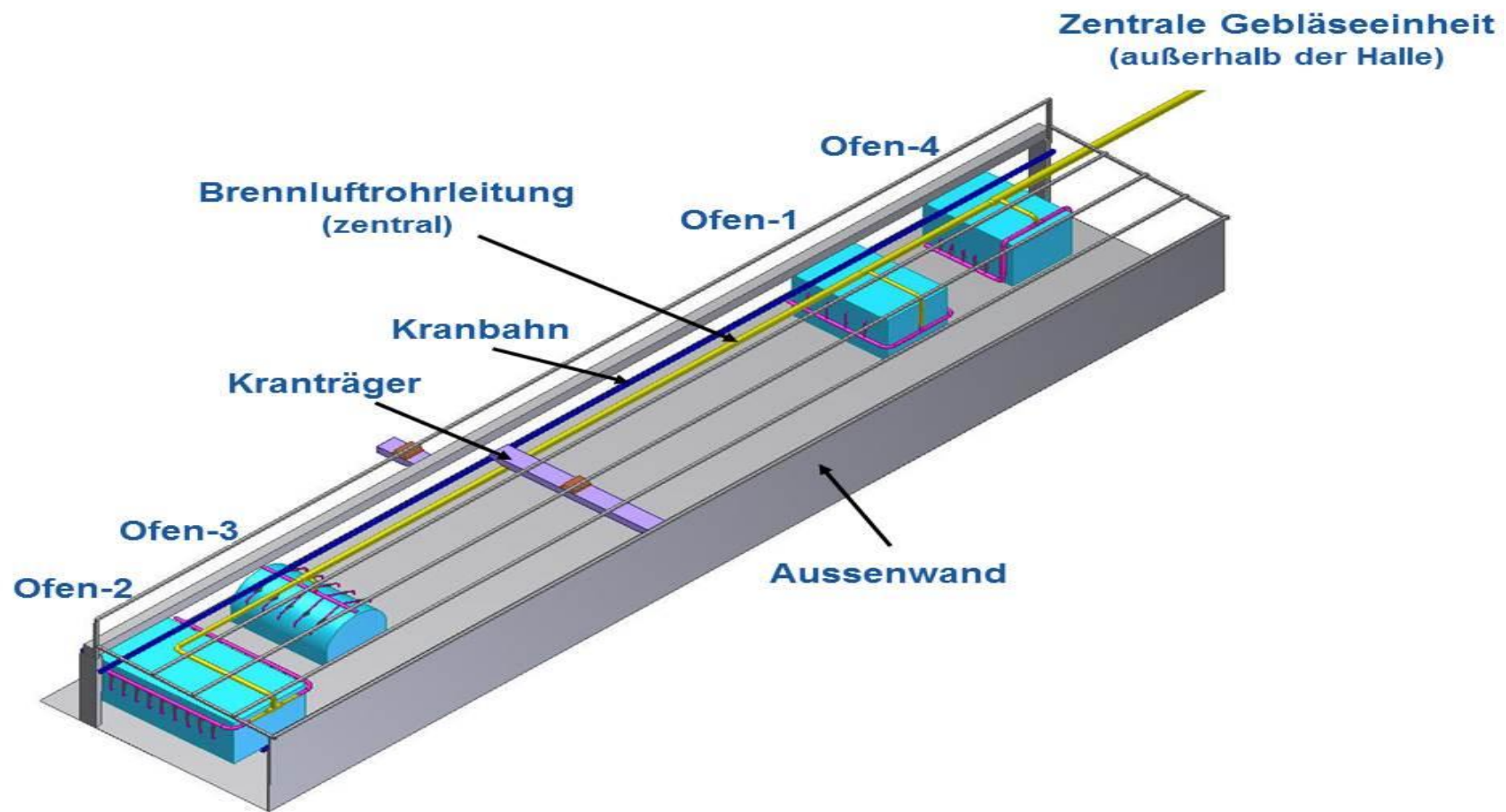
**Bild 21:** Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte), „max.“ (unten) bei dauerhaft eingeschaltetem. GLG 1, alle GLG mit verschobenem Betriebspunkt

## 2.4 Rohrleitungsnetz und Speicher

Die Auslegung des zentralen Brennluftleitungsnetzes erfolgte in zwei Schritten. Die Grundauslegung basiert auf einer klassischen Rohrleitungsberechnung unter Berücksichtigung ausschließlich nicht-dynamischer Strömungseffekte. Im zweiten Schritt erfolgte dann eine zusätzliche Bewertung dynamischer Effekte und Wechselwirkungen innerhalb des Netzes.

### 2.4.1 Grundauslegung

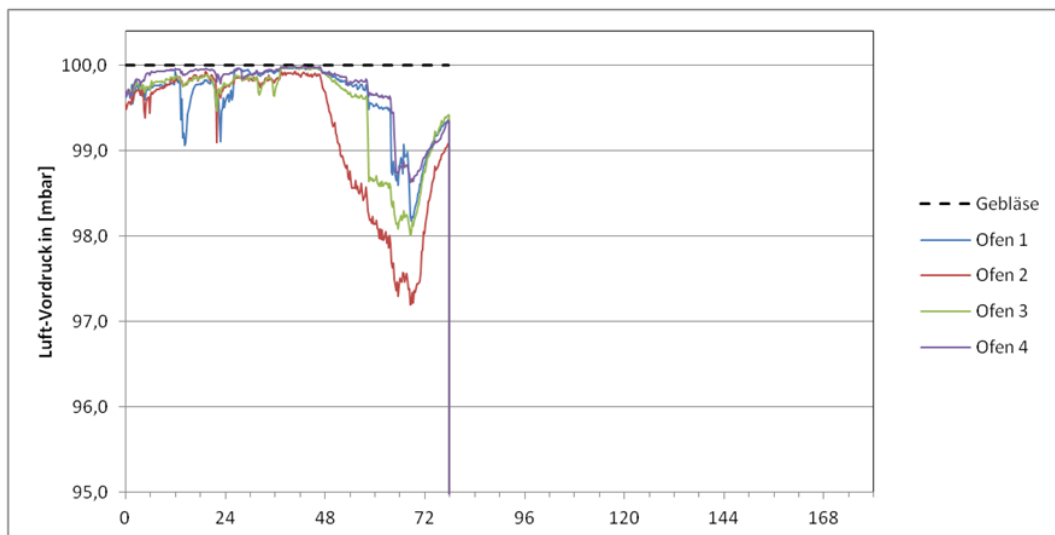
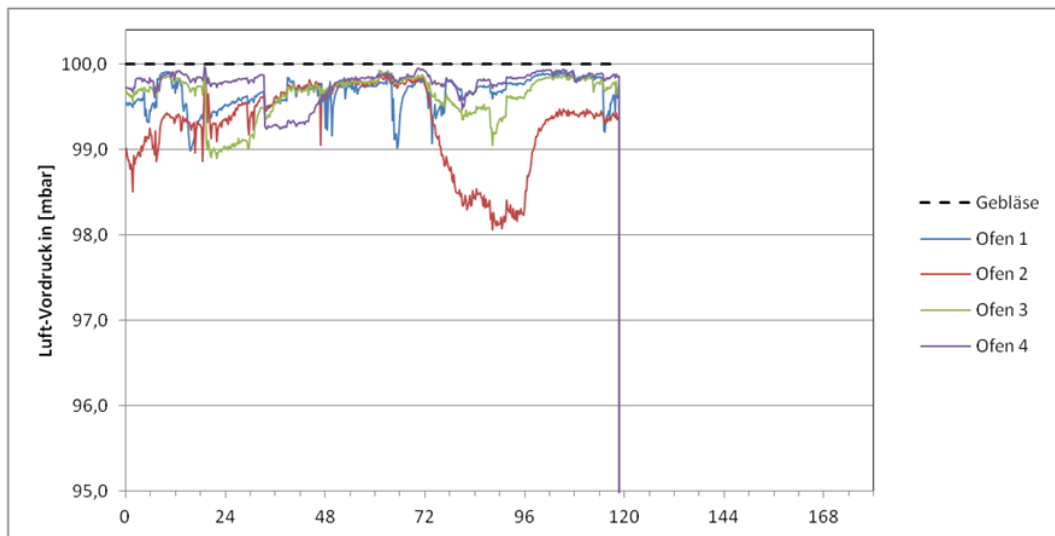
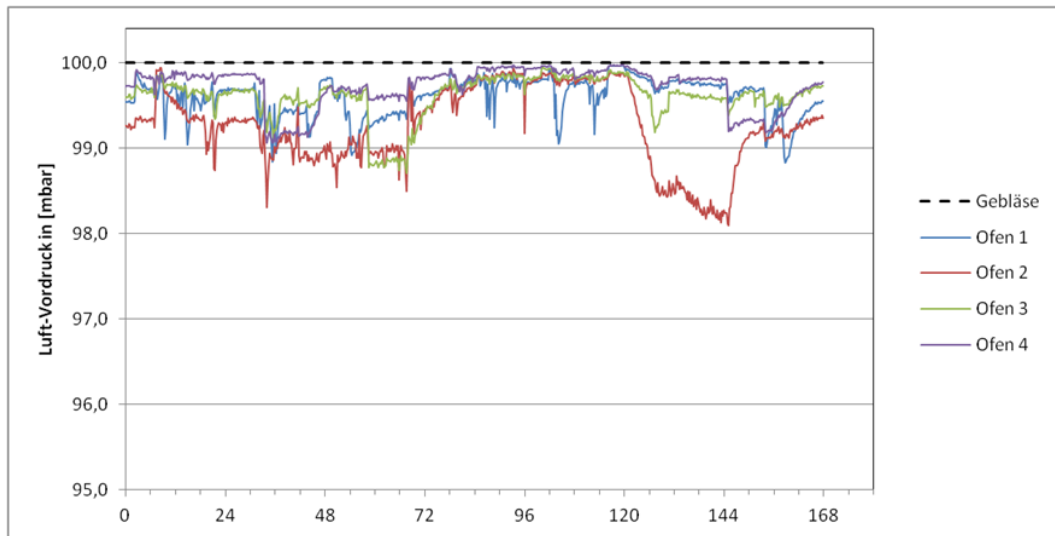
Zur konzeptionellen Vorauslegung einer zentralen Brennluftversorgung der ausgewählten Ofengruppe wurden die örtlichen Gegebenheiten vermessen und ein Hallenplan für den relevanten Bereich der Schmiedehalle im CAD erstellt (**Bild 22**). Das Layout beinhaltet neben den Ofenabmessungen, den Abständen zwischen den Öfen sowie der über den Öfen verlaufenden Kranbahn auch den Standort der zentralen Gebläseeinheit. Die räumliche Anordnung der zentralen Gebläseeinheit außerhalb des Hallenschiffes ist erst in einer Entfernung von 35 m zu Ofen 4 möglich und wurde aus Platzgründen auf dem Layout nicht dargestellt. Eine weitere Restriktion ist die Kranbahn. Da der Hallenkran zu Wartungszwecken an den Öfen gebraucht wird, muss die zentrale Brennluftzuleitung unterhalb der Kranbahn verlaufen. Eine Positionierung der zentralen Gebläseeinheit auf dem Hallendach ist somit nicht realisierbar. Die Leitungslängen und –verläufe (Rohrbögen, T-Stücke), welche für die folgende Druckverlustberechnung benötigt werden, wurden anhand des CAD-Layouts bestimmt.



**Bild 22:** CAD-Layout der ausgewählten Ofengruppe im Hallenschiff

Für die Auslegung der Rohrleitungsdurchmesser wurde das in Kap. 2.1 beschriebene eigenentwickelte Berechnungstool verwendet. Die Dimensionierung der Rohrleitungsdurchmesser für die einzelnen Netzbereiche erfolgte auf Grundlage einer maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeit von 8 bis 10 m/s in allen Rohrleitungen, was üblichen Werten entspricht. Nach Festlegung einer Vorauswahl aller Rohrleitungselemente wurden in einem nächsten Schritt die Druckverluste für jeden Abschnitt des Rohrleitungsnetzes berechnet, in Abhängigkeit des jeweils durchströmenden Volumenstroms. Durch Aufsummierung der Druckverluste auf jeden einzelnen „Strömungspfad“ wird dann der verbleibende Druck an jedem Ofen bestimmt. So ist es möglich, den an allen vier Öfen verbleibenden Brennluft-Vordruck für beliebige Betriebszustände zu berechnen. Für die drei Settings „real“, „homogen“ und „max.“ ergeben sich damit die in **Bild 23** dargestellten Brennluftvordruckverläufe unmittelbar vor den vier untersuchten Öfen. Hierbei wurde angenommen, dass der von der zentralen Gebläseeinheit generierte Vordruck bei konstant 100 mbar liegt. Wie zu erkennen ist, fallen die Drücke unmittelbar vor den vier Öfen mit dem berücksichtigten Rohrleitungsnetz in keiner Situation unter 97 mbar. Ein maximaler Druckverlust von 3 mbar ist ein mehr als ausreichend geringer Wert für ein Rohrleitungsnetz dieser Größenordnung.





**Bild 23:** Berechnete Brennluftvordruckverläufe an den Öfen 1 bis 4 für die Settings „real“ (oben); „homogen“ (Mitte) und „max.“ (unten)

## 2.4.2 CFD-Modell zur Simulation des entwickelten zentralen Brennluftversorgungssystems

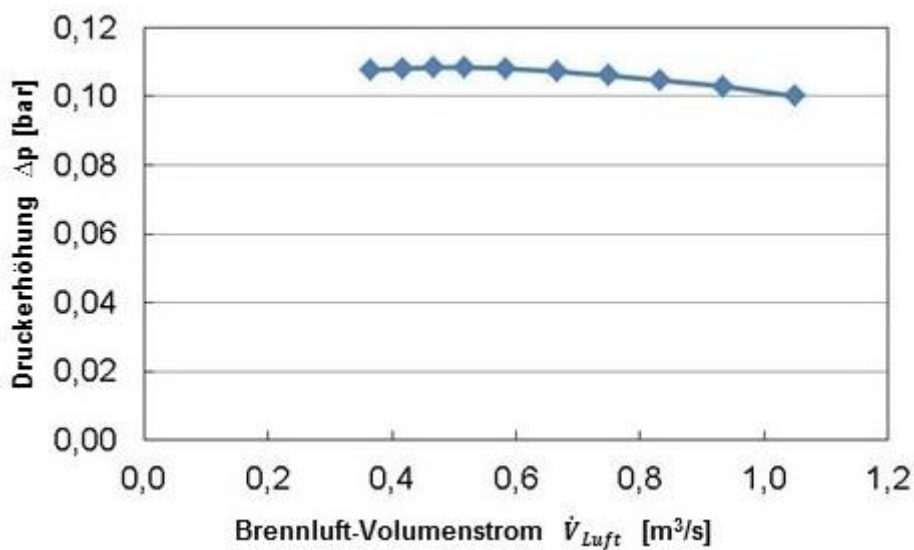
### 2.4.2.1 Aufsetzen des Flomasternetzwerks

Zur Ermittlung von Volumenstrom- und Druckprofilen der Brennluftverteilung bei Verwendung eines zentralen Gebläsesystems wurde das Rohrleitungssystem in der Simulationssoftware Flomaster abgebildet. Mit Flomaster können stationäre und transiente Berechnungen für inkompressible Flüssigkeiten und kompressible Gase in Leitungsnetzwerken durchgeführt werden. Die Software basiert auf der Stromfadentheorie, ist eindimensional und modular aufgebaut, wodurch die einzelnen Module für die spezifische Aufgabenstellung ausgewählt und entsprechend zu einem Netzwerk verknüpft werden können. Die Simulation stationärer Zustände ermöglicht die Analyse von Volumen-, Massenstrom-, Temperatur-, Wärmestrom- und Druckverteilungen sowie von Geschwindigkeiten, Stoffgrößenveränderungen (Dichte, Viskosität, usw.) und Kennzahlen (Nusselt, Reynolds, usw.). Durch transiente Berechnungen können die oben genannten Größen für zeitabhängige Vorgänge untersucht und bewertet werden, wie sie z.B. bei Ein- und Ausschaltvorgängen von Anlagen oder dem diskontinuierlichen Einspeisen von Medien in das Netzwerk vorliegen. So ist es möglich, Temperatur-, Druck- und Massenstromschwankungen aufzuzeigen und die Auswirkungen auf das Netzwerk zu erfassen und zu bewerten.

Die Leitungsdurchmesser und Längen wurden entsprechend der vorherigen Arbeiten zur Auslegung des Rohrleitungssystems in Flomaster übernommen. Als Grundlastgebläse wurde entsprechend einer ersten Vorauswahl beispielhaft der Gebläsetyp GBJ F08040 der Fa. CIMME angenommen und in Flomaster mit der Komponente „Fan“ dargestellt. In **Tabelle 3** sind die wichtigsten Daten der Grundlastgebläse zusammengefasst. **Bild 24** zeigt die Kennlinie der Gebläse. Insgesamt wurden zwei Grundlastgebläse in das Modell eingebunden.

**Tabelle 3:** Daten der Grundlastgebläse, Hersteller: CIMME, Typ: GBJ F08040

Drehzahl: 2900 U/min			
Volumenstrom			Druckerhöhung
m <sup>3</sup> /min	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s	bar
22	1.320	0,367	0,1077
25	1.500	0,417	0,1081
28	1.680	0,467	0,1084
31	1.860	0,517	0,1084
35	2.100	0,583	0,1081
40	2.400	0,667	0,1072
45	2.700	0,750	0,1060
50	3.000	0,833	0,1047
56	3.360	0,933	0,1029
63	3.780	1,050	0,1001



**Bild 24:** Kennlinie-Grundlastgebläse

Das Regelgebläse ist als Kolbengebläse ausgelegt. Hierfür gibt es in Flomaster keine Komponente, so dass das Regelgebläse zunächst behelfsweise als „Flow Source“ dargestellt wurde, die immer den gleichen Volumenstrom fördert, unabhängig vom Druck im System.

Zur Untersuchung des Regelverhaltens der Grundlast- und Regelgebläse wurden Voruntersuchungen mit folgenden Randbedingungen festgelegt:

- **Version 1** „Pressure Source“: der Druck (20 mbar) an den Brennern wird vorgegeben, die Regelgröße ist der Volumenstrom (Volumenstromregelung durch die Drosselklappen)
- **Version 2** „Flow Source“: die Volumenströme werden von den Öfen abgesaugt, die Regelgrößen sind die Brennerdrücke (Druckregelung durch die Drosselklappen)

Zur Überprüfung des Netzwerks wurden in Voruntersuchungen 2 Fälle berechnet:

**Fall 1:**

1. Öfen 1, 3 und 4 werden in Teillast bei 30 % betrieben,
2. Ofen 2 wird in Volllast (100 %) betrieben,
3. Schnellschluss Ofen 2 nach 2 s, Laufzeit der Klappen 2 s,
4. Grundlastgebläse und Regelgebläse laufen nach dem Schnellschluss von Ofen 2 normal weiter,
5. Klappen vor den Brennern regeln den Druck.

**Fall 2:**

Positionen 1 bis 4 entsprechend Fall 1 und

5. Keine Regelung durch die Klappen vor den Brennern: die Klappen verbleiben in einer festgestellten Position.

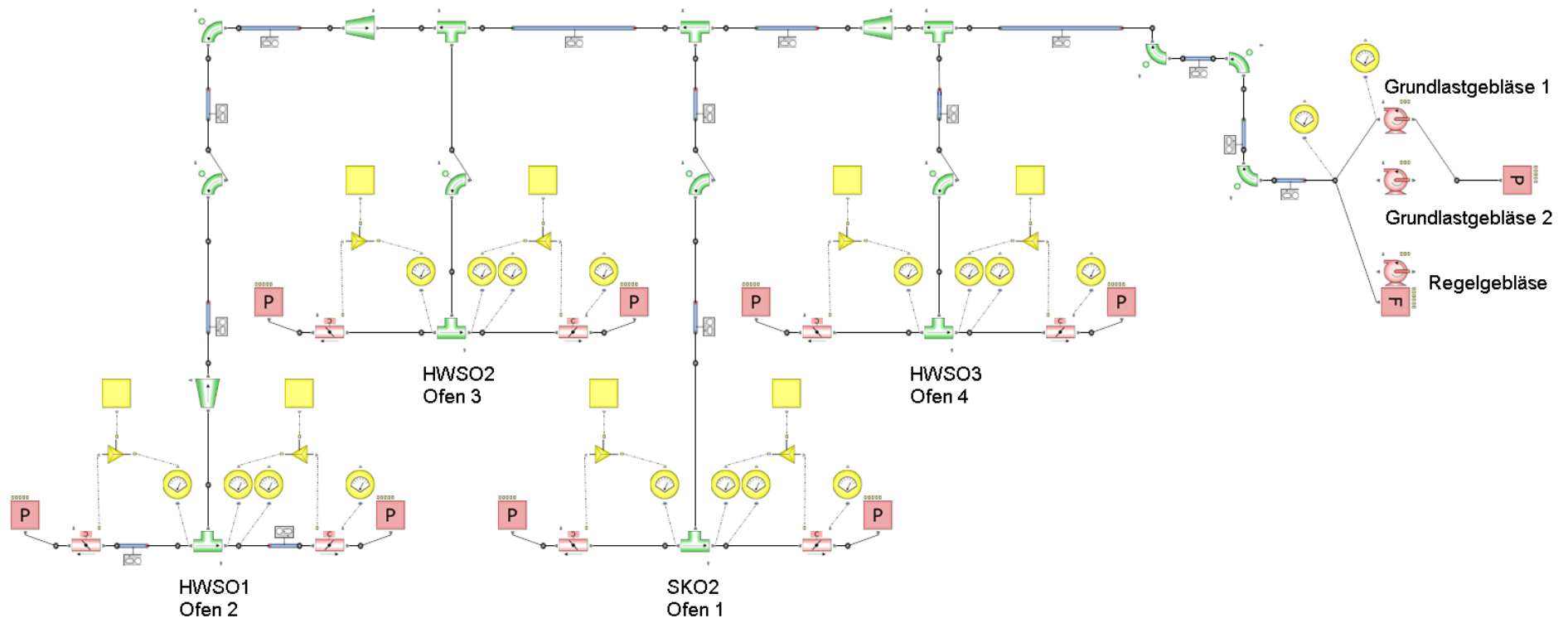
In **Tabelle 4** sind die Volumen- und Massenströme zusammengefasst.

**Tabelle 4:** Volumen- und Massenströme an den vier Öfen

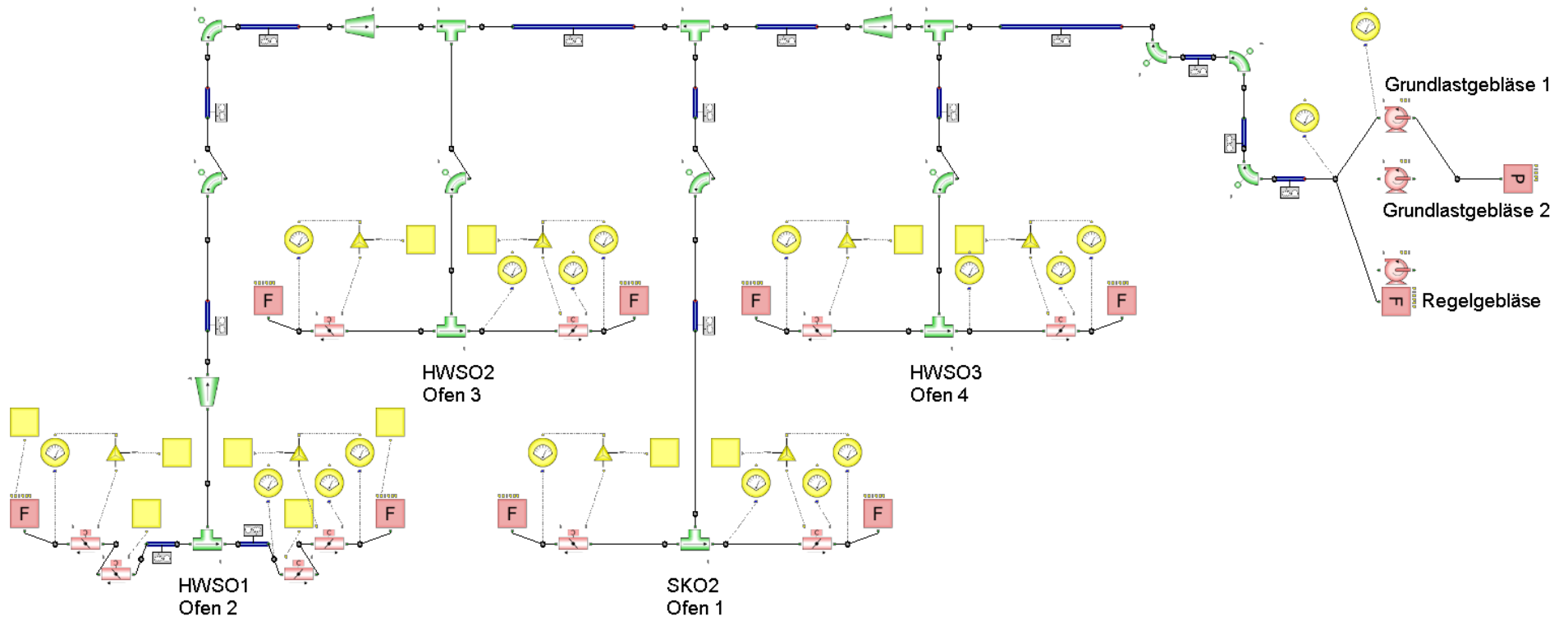
	<b>Ofen 1</b>	<b>Ofen 2</b>	<b>Ofen 3</b>	<b>Ofen 4</b>
<b>Bezeichnung</b>	SKO2	HWSO1	HWSO2	HWSO3
Volumenstrom bei Volllast [m <sup>3</sup> /h]	1.584	3.564	1.485	2.376
Massenstrom bei Volllast [kg/s]	0,5236	1,1781	0,4909	0,7854
Massenstrom bei Volllast je Ofenhälfte [kg/s]	0,26180	0,58905	0,24544	0,39270
Massenstrom bei Teillast (30%) [kg/s]	0,07854	0,17672	0,07363	0,11781

In **Bild 25** und **Bild 26** sind die Brennluftverteilungen in Flomaster für die beschriebenen Versionen 1 und 2 dargestellt. Es wurde nicht jeder Brenner einzeln modelliert, sondern die Brenner einer Ofenhälfte wurden jeweils zusammengefasst. Die Klappen vor den Brennern regeln den Druck an den Brennern.

Der erforderliche Druck nach den Gebläsen bzw. vor den Regelklappen an den Öfen wurde mit rd. 100 mbar angenommen. Der erforderliche Druck nach den Regelklappen an den Brennern wurde mit 20 mbar festgelegt.



**Bild 25:** Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, **Version 1**



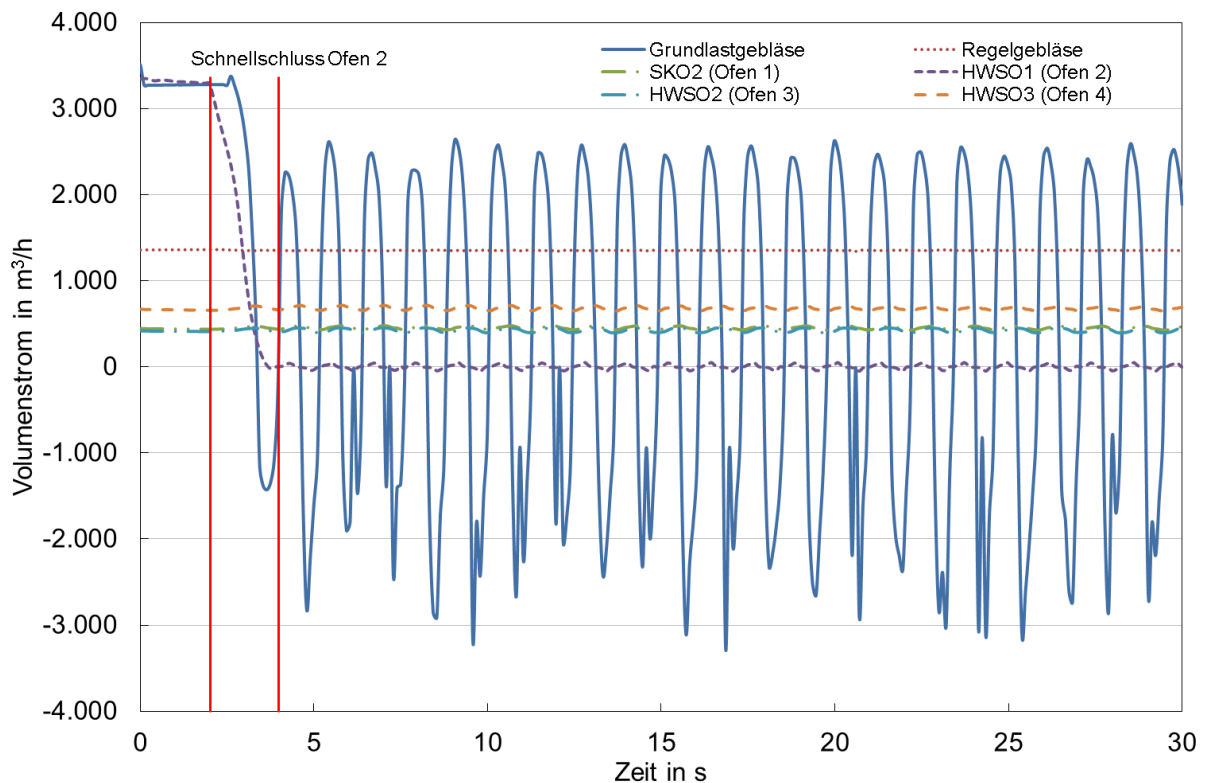
**Bild 26:** Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, **Version 2**

### 2.4.2.2 Ergebnisdiskussion der Flomastersimulationen

Das Ziel einer zentralen Brennluftversorgung der Ofengruppe ist die Erreichung konstanter Brennerdrücke (20 mbar) bei variierenden Volumenströmen (z.B. bei Zu- und Abschalten von Brennern oder Öfen).

Daher werden nachfolgend die Simulationsergebnisse für **Version 1/ Fall 2** aufgezeigt und diskutiert.

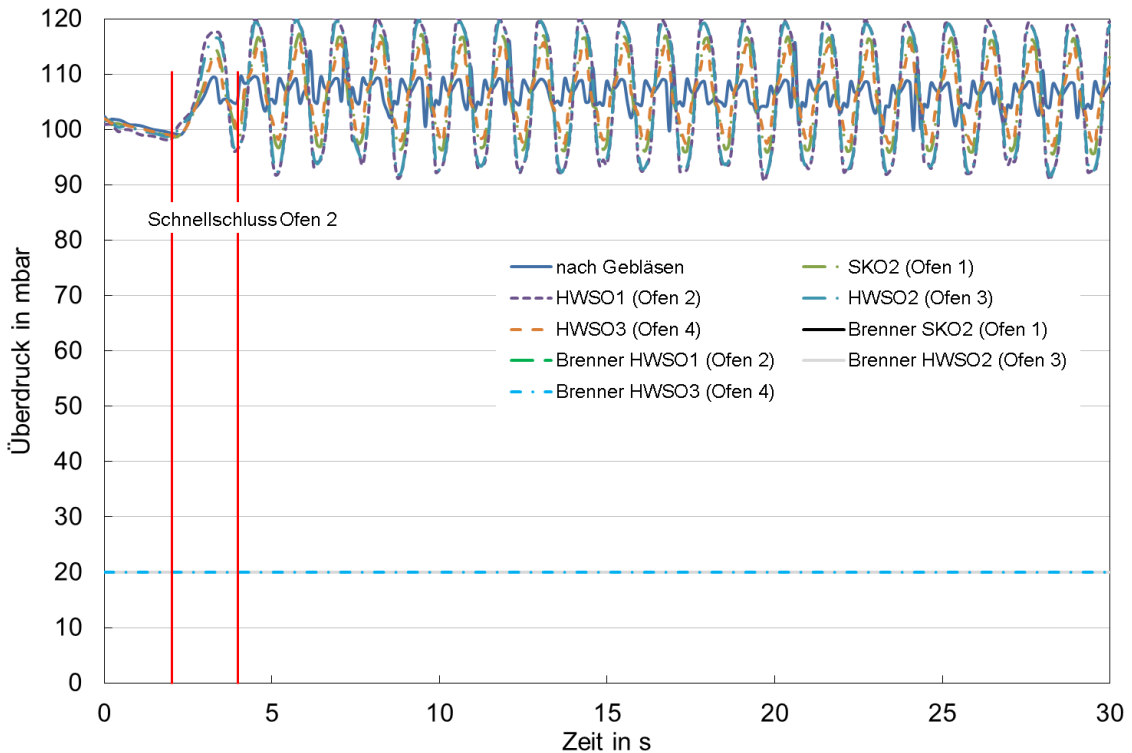
Die berechneten Volumenströme werden in **Bild 27** und die Drücke nach den Gebläsen sowie an den Brennern werden in **Bild 28** dargestellt.



**Bild 27:** Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung, **Version 1/ Fall 2**

Nach dem Schließen der Klappen am Ofen 2 (schnelles Abschalten) kommt es unter den gegebenen Randbedingungen zu starken Schwingungen des Volumenstroms des Grundlastgebläses. Das Regelgebläse verhält sich entsprechend der Vorgabe und fördert konstant weiter. Die Volumenströme der Öfen 1, 3 und 4 bleiben konstant. Die Ausschläge in den negativen Bereich bedeuten, dass Luft in das Grundlastgebläse zurückströmt.

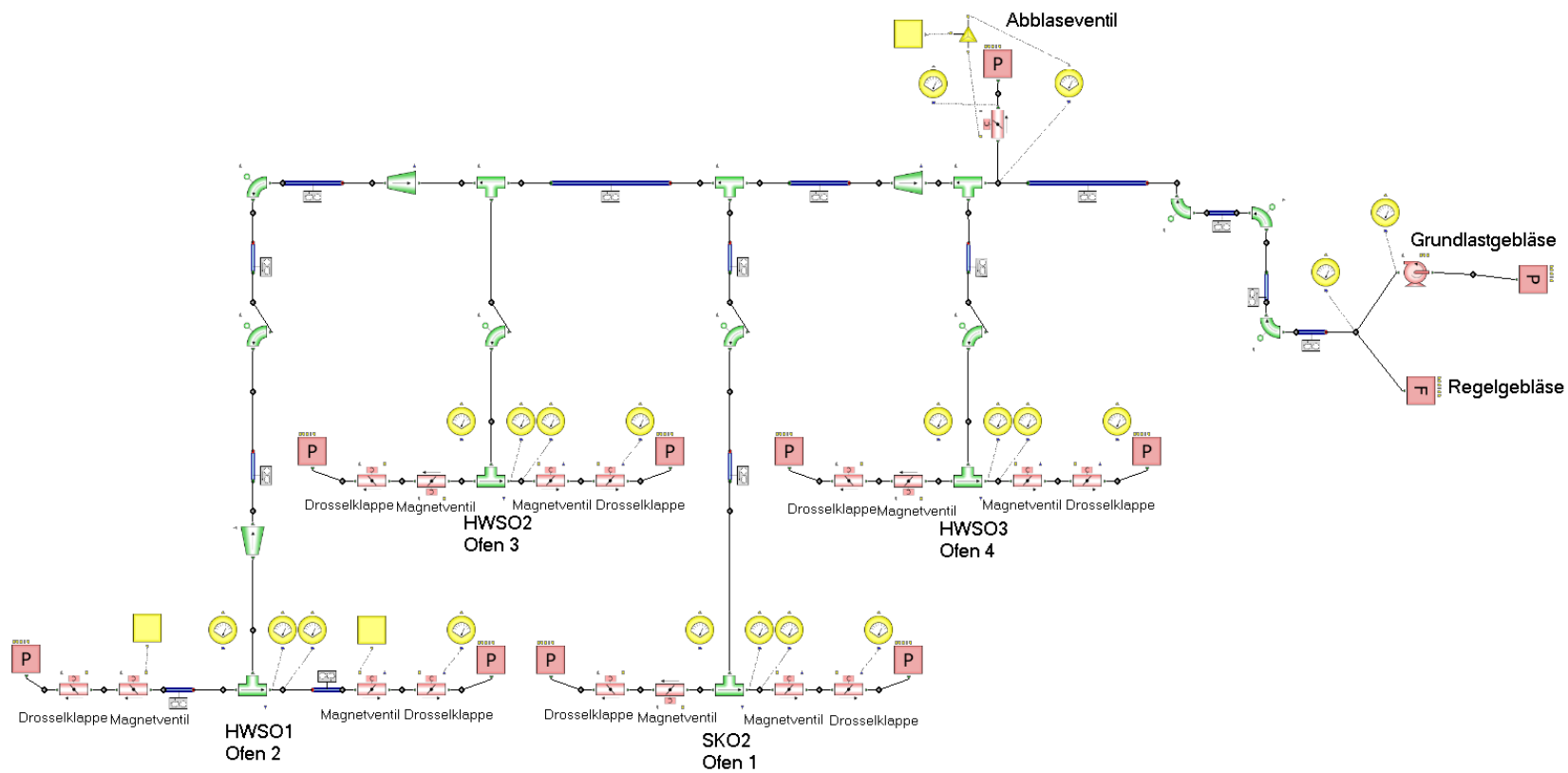




**Bild 28:** Berechnete Drücke der Brennluftverteilung, **Version 1/ Fall 2**

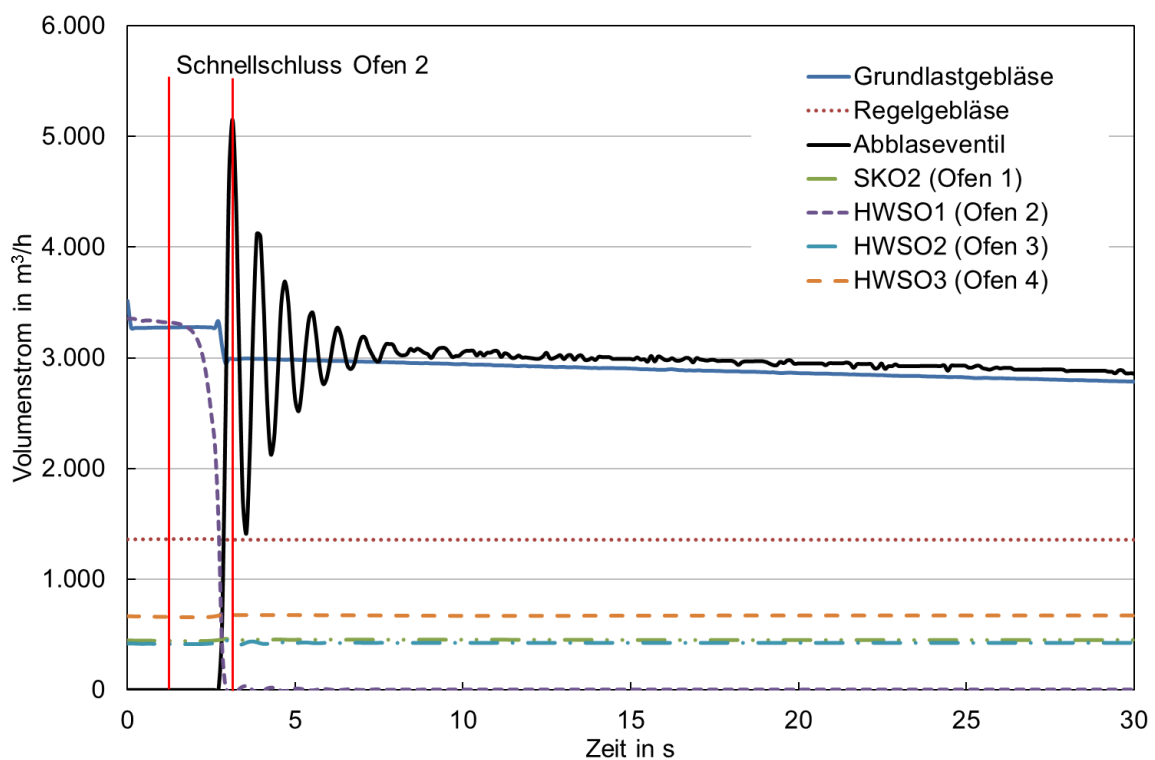
Dementsprechend schwingt auch der Druck im Netzwerk sehr stark mit Amplituden zwischen 90 bis 120 mbar. Das Schwingungsverhalten der Volumenströme und Systemdrücke muss als Prozessinstabilität interpretiert werden und ist somit unbedingt zu vermeiden.

Zur Erreichung einer besseren Prozessstabilität wurde das Flomaster- Netzwerk modifiziert (siehe **Bild 29**). Die Brenner wurden als eine "Abblasung („Pressure Source“) in die Umgebung über eine „feste Drossel" mit vorgeschaltetem Auf/Zu-Magnetventil dargestellt. Die Drosselklappen wurden auf eine feste Position gestellt, so dass sich je Ofen der Durchfluss entsprechend **Tabelle 4** ergab.

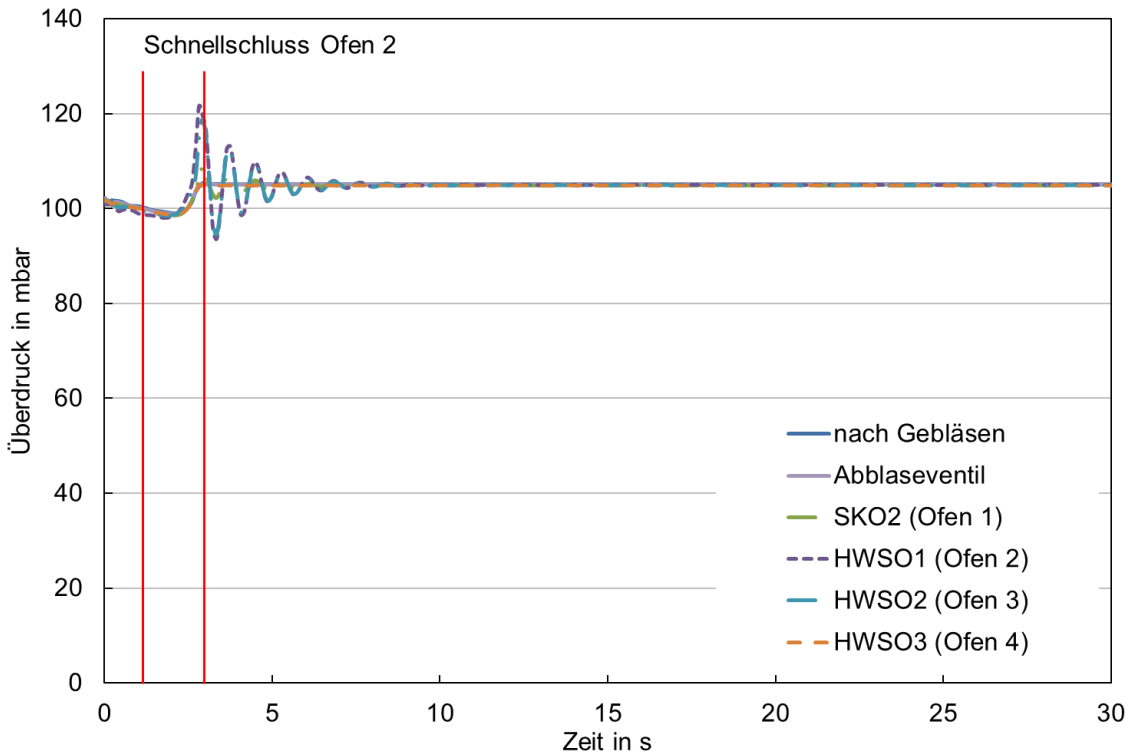


**Bild 29:** Darstellung der Brennluftverteilung in Flomaster, modifizierte **Version 1**

In **Bild 30** und **Bild 31** werden die Ergebnisse der Simulation für einen Zeitraum von 30 s aufgezeigt. Im Unterschied zu den vorigen Berechnungen (Vergleich mit **Bild 27** und **Bild 28**) werden hier die Schwingungen, ausgelöst durch das schnelle Abschalten von Ofen 2, durch das Abblaseventil nach wenigen Sekunden abgebaut. Der geförderte Volumenstrom des Grundlastgebläses verringert sich nur in geringem Maße, da ein Großteil des Volumenstroms über das Abblaseventil an die Umgebung abgegeben wird. Der Brennluftstrom zu den Brennern der Öfen 1, 3 und 4 bleibt weitestgehend konstant. Durch das Abblaseventil stellt sich nach kurzer Zeit ein konstanter Druck von rd. 105 mbar ein.



**Bild 30:** Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung mit dem modifizierten Flomasternetzwerk, **Version 1/ Fall 2**



**Bild 31:** Berechnete Drücke der Brennluftverteilung mit dem modifizierten Flomasternetzwerk, **Version 1/ Fall 2**

Zur Überprüfung des Verhaltens des Grundlastgebläses an Betriebspunkten links und rechts des Druckmaximums auf der Gebläsekennlinie (**Bild 24**) wurden folgende Fälle mit dem Netzwerk (**Bild 29**) berechnet:

1. Betriebspunkt rechts vom Druckmaximum:

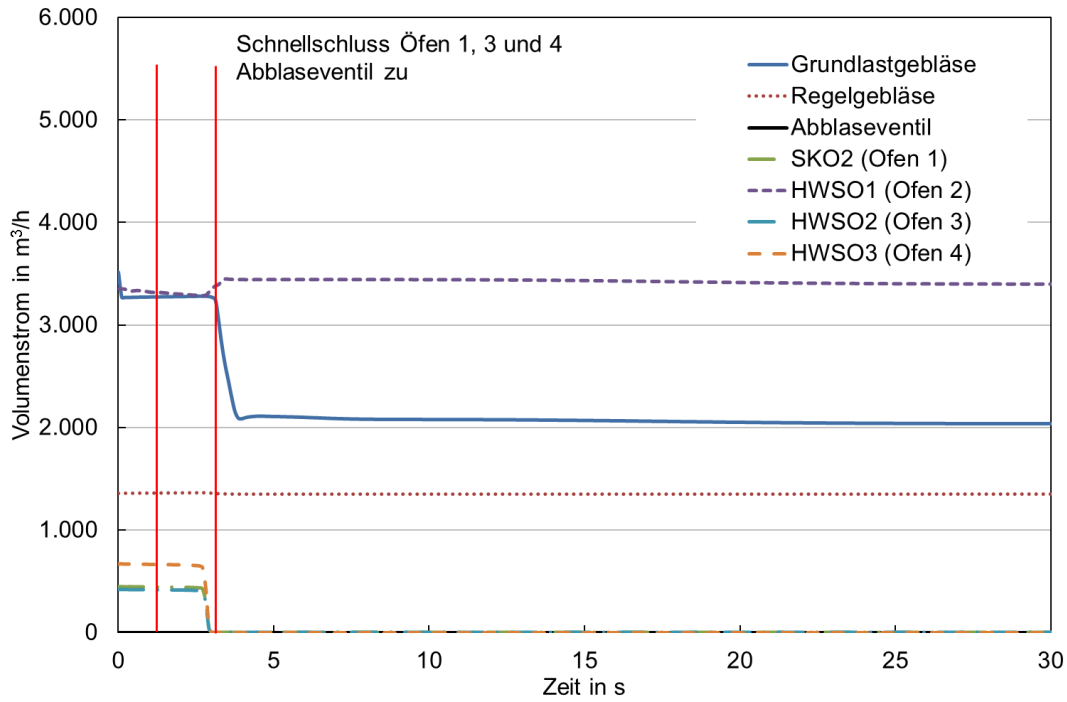
- Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m<sup>3</sup>/h,
- Berechnung jeweils mit geschlossenem (Fall 1 a) und aktivem Abblaseventil (Fall 1 b).

2. Betriebspunkt links vom Druckmaximum:

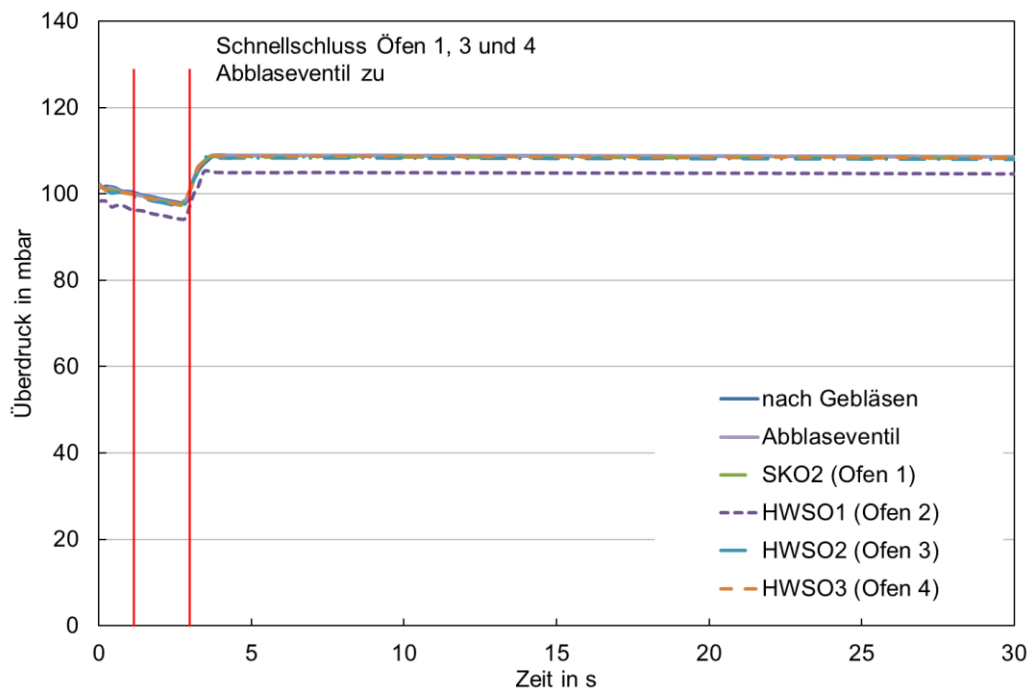
- Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m<sup>3</sup>/h
- Berechnung jeweils mit geschlossenem (Fall 2 a) und aktivem Abblaseventil (Fall 2 b).

Im Betrieb wäre die simulierte Situation durch ein schnelles Abschalten (Schnellschluss) der Öfen 1, 3 und 4 sowie einer reduzierten Volumenstromabnahme des Ofen 2 gekennzeichnet.

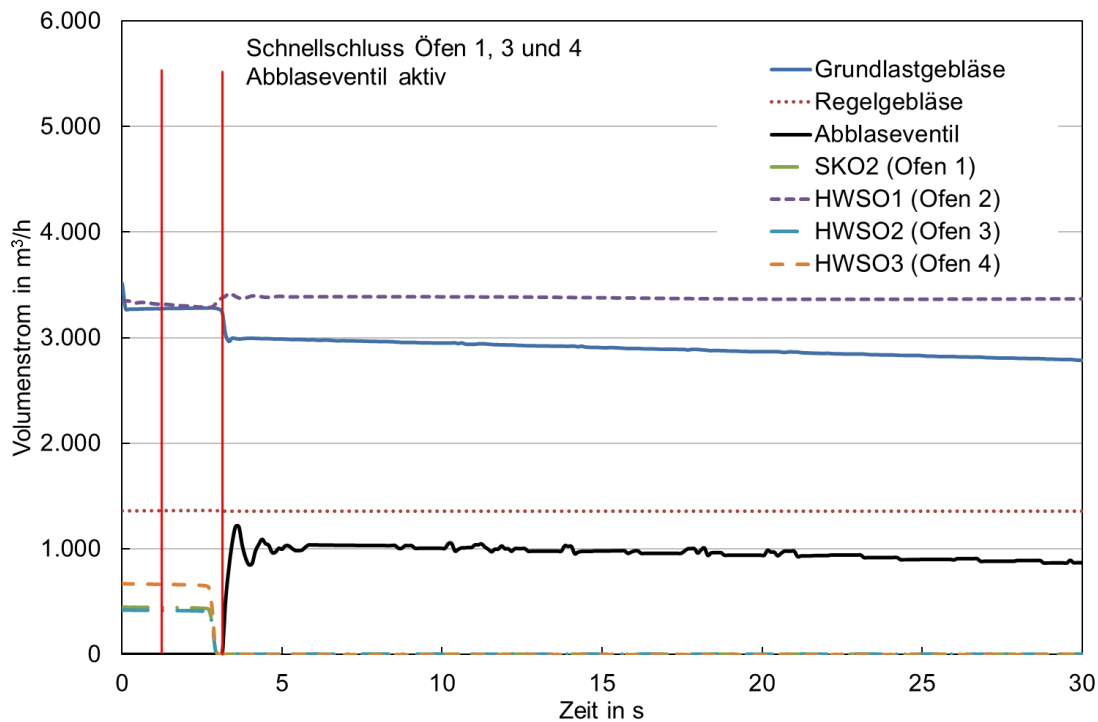
Die Fälle 1a und 1b zeigen, dass das Grundlastgebläse nach der Verringerung des Volumenstroms weiter gleichmäßig läuft und keine Druck- oder Volumenschwankungen auftreten (**Bild 32** bis **Bild 35**).



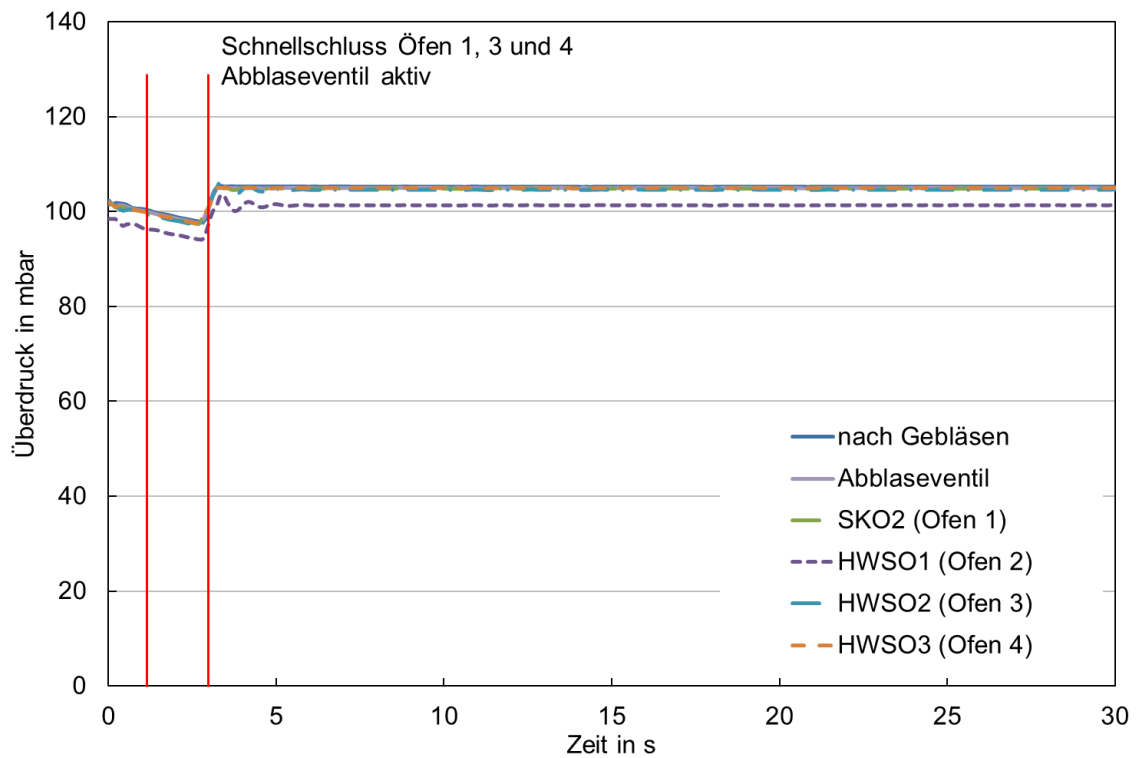
**Bild 32:** Fall 1a: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil geschlossen



**Bild 33:** Fall 1a: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil geschlossen

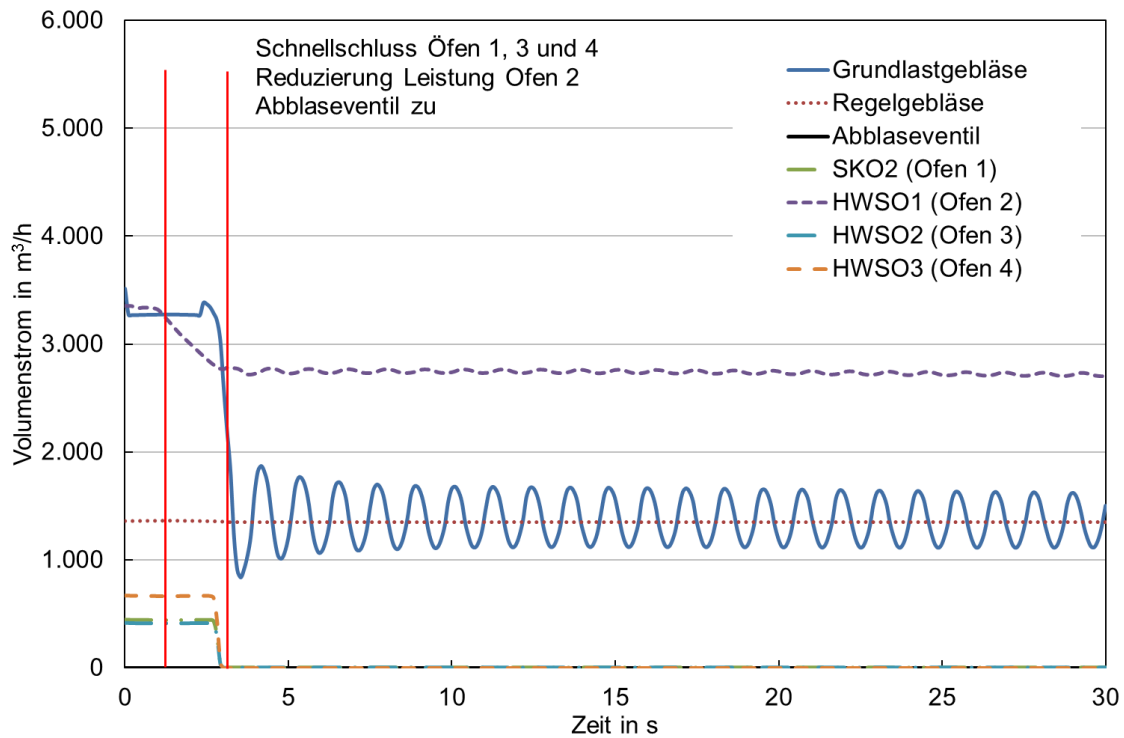


**Bild 34:** Fall 1b: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil aktiv

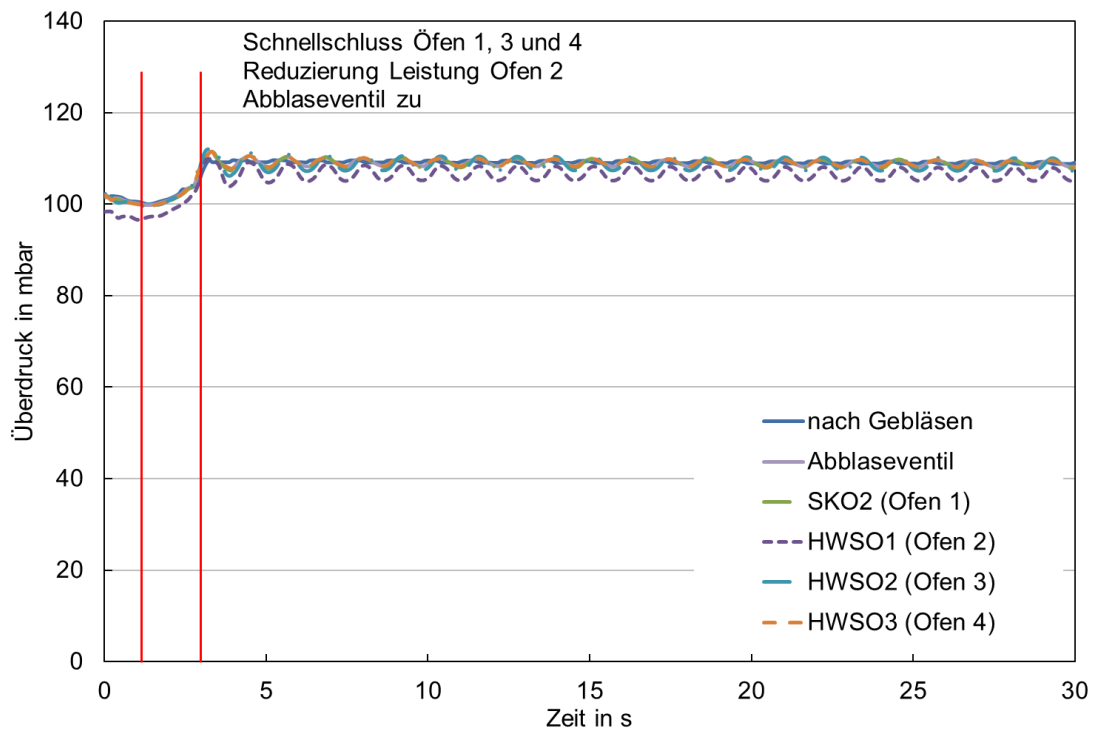


**Bild 35:** Fall 1b: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.200 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil aktiv

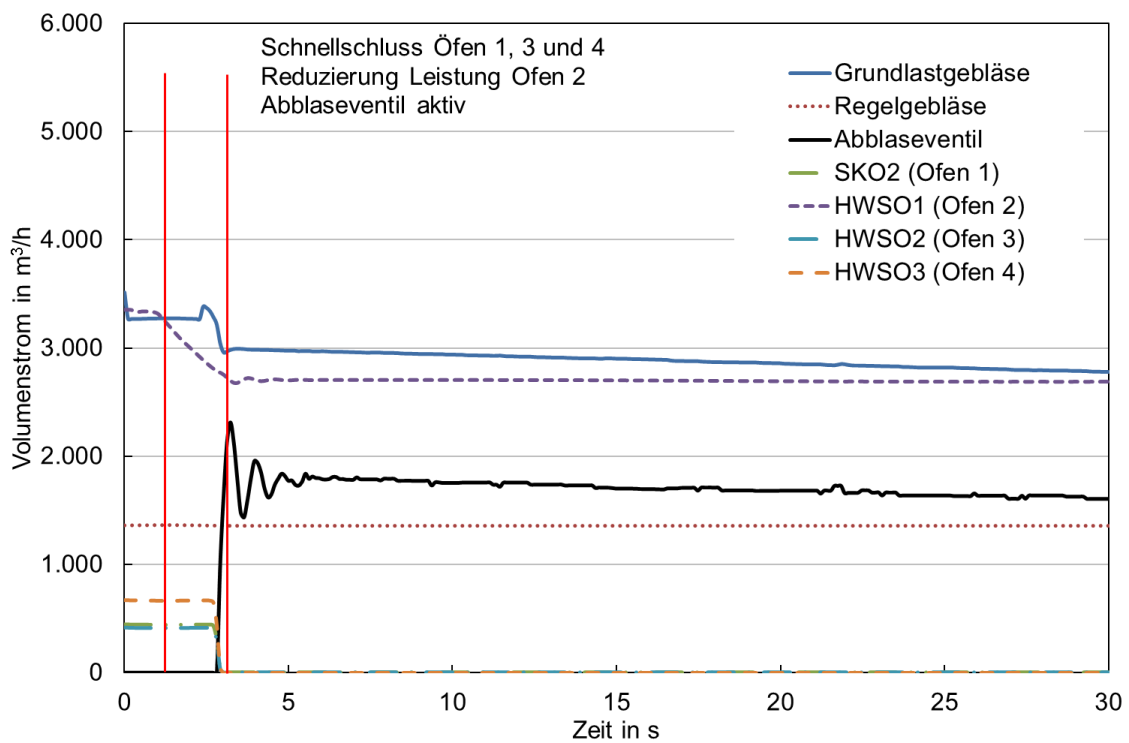
Im Fall 2a zeigt sich, dass die Verringerung des Brennluftvolumenstroms auf einen Punkt links vom Druckmaximum des Gebläses zu einer schwankenden Fördermenge führt, mit entsprechenden Druckschwankungen im gesamten System (**Bild 36** und **Bild 37**). Durch das Abblaseventil (Fall 2b) können diese Schwankungen innerhalb weniger Sekunden abgebaut werden (**Bild 38** und **Bild 39**).



**Bild 36:** Fall 2a: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil geschlossen

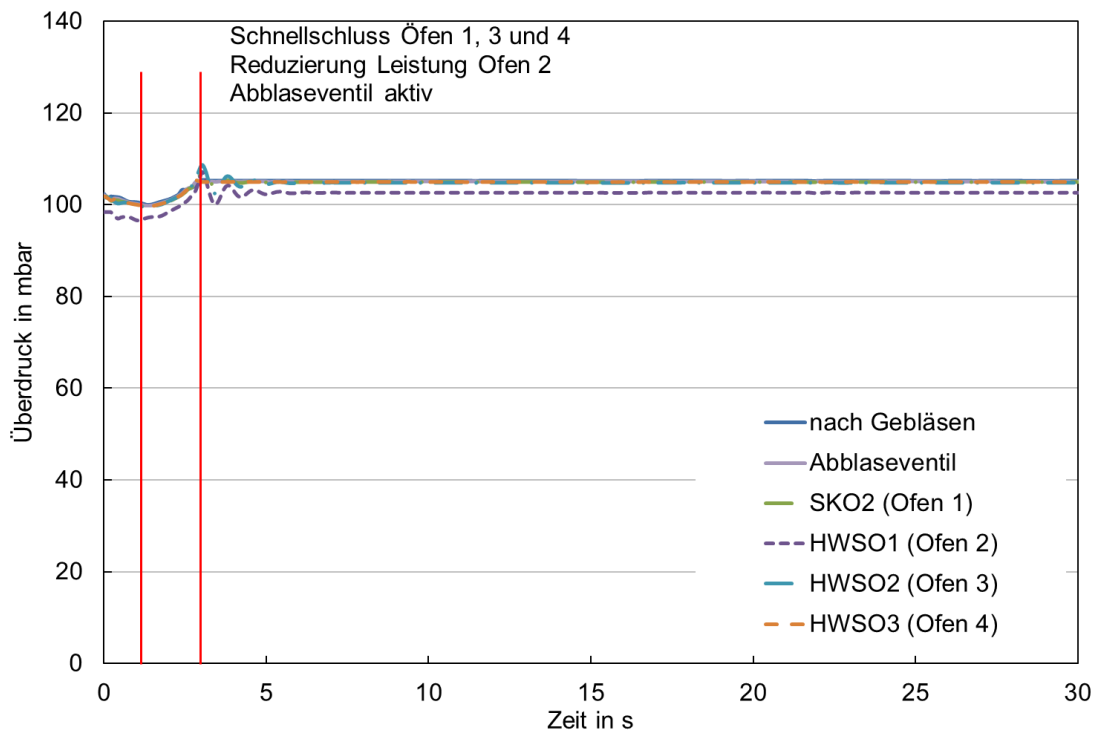


**Bild 37:** Fall 2a: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil geschlossen



**Bild 38:** Fall 2b: Berechnete Volumenströme der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil aktiv





**Bild 39:** Fall 2b: Berechnete Drücke der Brennluftverteilung bei Reduzierung des Volumenstroms um rd. 1.900 m<sup>3</sup>/h, Abblaseventil aktiv

### 2.4.3 Speicher

Mit den numerischen Simulationsrechnungen wurde gezeigt, dass bei geeigneter Konzeption des Rohrleitungsnetzes eine stabile Regelung der Brennluftversorgung möglich ist. Bei einer Schnellabschaltung eines gesamten Ofens der Ofengruppe (ca. 25 % der Nennleistung) kommt es lediglich zu marginalen Schwankungen des Vordrucks in der Brennluftleitung. Wie die in **Bild 35** und **Bild 39** dargestellt, wird in weniger als 5 Sekunden wieder ein stabiler Vordruck erreicht. Die maximalen Schwankungen des Vordrucks betragen dabei weniger als 10 mbar und bewegen sich damit in einem Bereich, der bei derzeitiger Betriebsweise der Öfen durch die üblichen Anpassungen der Ofenleistungen durchfahren wird.

Das Zusammenspiel aus Radialgebläsen für die Grundlast und einem Kolbengebläse für die zu regelnde Last, die aktive Dämpfung durch ein Abblaseventil und die passive Dämpfung durch das Volumen des Rohrleitungssystems sind ausreichend, um einen stabilen Brennluftvordruck einzustellen. Weitere Speicher sind für den Betrieb derartiger Gebläsegruppen daher nicht erforderlich.

## 2.5 Untersuchung, Vermessung und Verifizierung der zentralen Gebläseeinheit auf einem Gebläseprüfstand

Um das Zusammenwirken von Radial- und Drehkolbengebläse als eine zentrale Gebläseeinheit unter praxisnahen Betriebsbedingungen untersuchen zu können, wurde ein entsprechender Prüfstand konstruiert und errichtet. Primäres Ziel der Untersuchungen war es, mit Hilfe des Prüfstandes negative Wechselwirkungen, wie beispielsweise Luftsäulenschwingungen in der gemeinsamen Verteilleitung der beiden Gebläsetypen, ausschließen zu können. Es sollten aber auch die Einsatzgrenzen des Systems, speziell mit Blick auf den untersten Teillastbereich, untersucht werden. Außerdem sollte auf Basis einer breiten messtechnisch ermittelten Datengrundlage das eigens entwickelte Berechnungstool (vgl. **Kap. 2.1**) um die Funktion einer simulativen energetischen Bewertung verschiedenster Betriebssituationen erweitert werden.

Hierzu wurden die gewählten Gebläse erst einzeln und anschließend gemeinsam vermessen.

Bei dem als Grundlastgebläse gewählten Radialgebläse wurde hierzu bei Nenndrehzahl der gesamte relevante Betriebsbereich kontinuierlich vermessen, sowie die Stromaufnahme an diversen ausgewählten Betriebspunkten protokolliert.

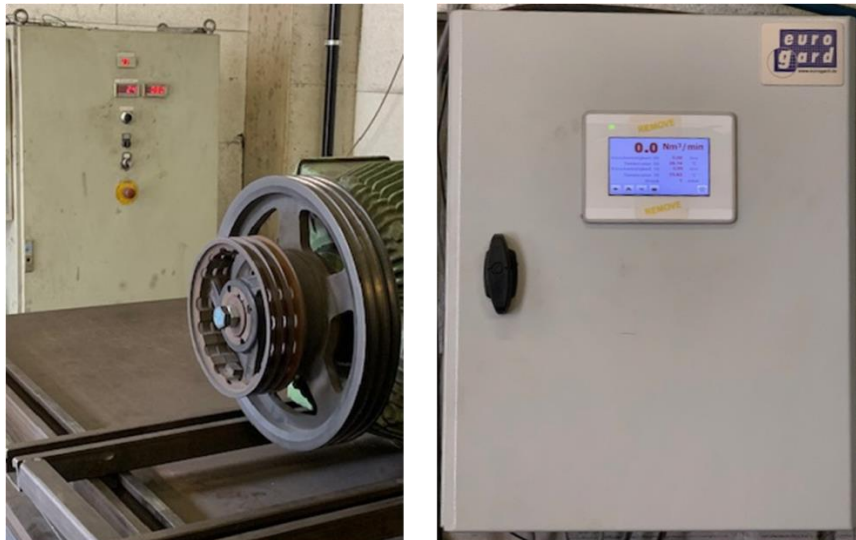
Bei dem Drehkolbengebläse (Regelgebläse) wurde für fünf verschiedene Drehzahlen speziell der unterste Teillastbereich kontinuierlich vermessen, da dies nicht dem bisher üblichen Betriebsbereich dieser Gebläse entspricht und daher nur wenig Erfahrung und belastbare Betriebsdaten hierzu vorliegen. Die Stromaufnahme des Gebläses wurde auch hier für alle relevanten Betriebspunkte zusätzlich erfasst.

Die Erfassung der Stromaufnahme erfolgte mittels eines, in den Schaltschrank des verwendeten Frequenzumrichters, integrierten Messsystems (s. **Kap. 2.5.1**).

Da sowohl die Messgenauigkeit dieses Systems als auch eine eventuelle Messwertbeeinflussung durch den internen Wirkungsgrad des Frequenzumrichters nicht abschließend geprüft werden konnte, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ermittelten Absolutwerte für Wirkungsgrade und Leistungsaufnahmen ggf. nur für die am aktuellen Prüfstand vorhandene Kombination aus Gebläsen und Frequenzumrichter gelten. Zur qualitativen Beurteilung sind die Messwerte jedoch uneingeschränkt nutzbar.

### 2.5.1 Der verwendete Prüfstand

Der errichtete Prüfstand bietet die Möglichkeit, sowohl ein einzelnes Gebläse als auch zwei verschiedene Gebläse(-typen) zeitgleich zu untersuchen. Hierbei kann ein Gebläse über einen Frequenzumrichter drehzahl geregelt werden (s. **Bild 40**, links), während das mögliche zweite Gebläse lediglich zu- und abgeschaltet werden kann.

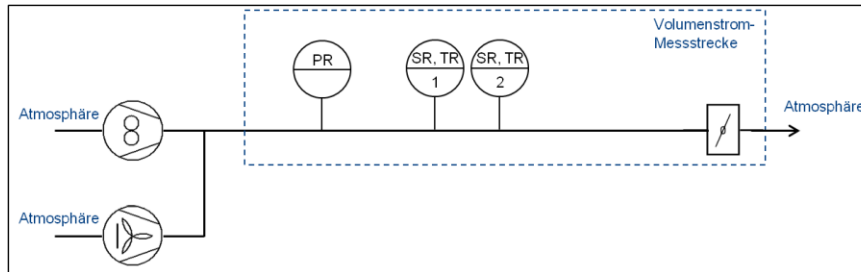


**Bild 40:** Per Frequenzumformer drehzahlregelbarer Antriebsmotor für Drehkolbengebläse (links) und Messwertfassung der Volumenstrommessstrecke (rechts)

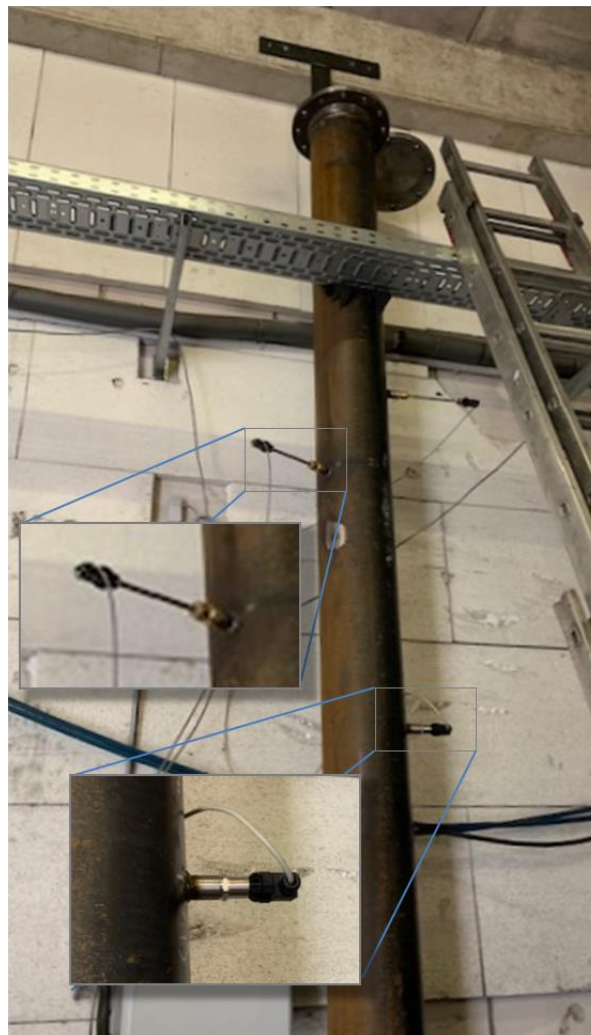
Bei der Untersuchung zweier Gebläse sind diese parallel installiert und fördern in eine gemeinsame Volumenstrommessstrecke, welche der späteren gemeinsamen Verteilung entspricht. Am Ende der Messstrecke ist ein manuelles Drosselorgan installiert, womit verschiedene Anlagenkennlinien bzw. die „Abnahmefähigkeit“ der später über die gemeinsame Versorgungsleitung versorgten Öfen simuliert werden können. Innerhalb der Messstrecke werden die Strömungsgeschwindigkeiten über zwei Hitzdrahtanemometer, die Lufttemperatur, sowie der statische Luftdruck erfasst. Über die zugehörige automatische Messwertfassung und -aufbereitung (**Bild 40**, rechts) werden hieraus beispielsweise der Volumenstrom sowie die erzielte Totaldruckerhöhung ermittelt und kontinuierlich mitgeschrieben.

Der Aufbau der Messstrecke ist in **Bild 41** dargestellt, eine fotografische Ansicht in **Bild 42**.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden mit dem Prüfstand erst die gewählten Radial- und Drehkolbengebläse einzeln (**Kap. 2.5.2 und 2.5.3**) und anschließend gemeinsam (**Kap. 2.5.4**) vermessen.



**Bild 41:** R&I-Schema des Prüfstandes



**Bild 42:** Fotografische Ansicht der verwendeten Volumenstrommessstrecke

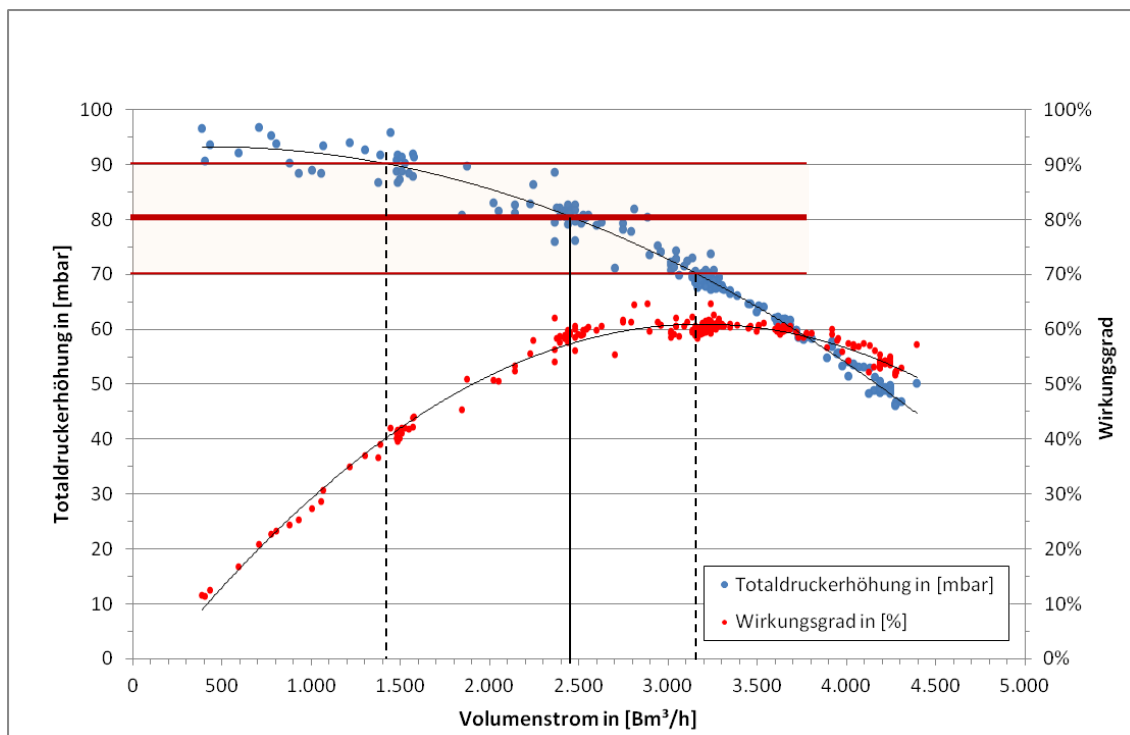
## 2.5.2 Messtechnische Untersuchung des Grundlastgebläses

Bei dem messtechnisch untersuchten Radialgebläse (Grundlastgebläse) handelt es sich nicht um das für die Simulationsuntersuchungen (s. **Kap. 2.4**) gewählte Gebläse vom Typ CIMME GBJ F08040 sondern um ein vergleichbares Gebläse der Firma PILLER vom Typ 3246MN80225.

Für die messtechnischen Untersuchungen wurde dieses Gebläse gewählt, da die durchgeführten Simulationen bereits ergeben hatten, dass die Verwendung von Grundlastgebläsen mit ausgeprägten Maxima im Verlauf der volumenstromabhängigen Totaldruckerhöhung für den Einsatz innerhalb einer zentralen Gebläseeinheit eher nachteilig sind. Gegenüber dem Gebläse der Firma CIMME versprach das gewählte Gebläse hier ein erheblich geringer ausgeprägtes Maximum, welches zudem weit nach „links“, hin zu sehr kleinen Volumenströmen verschoben ist. **Bild 43** zeigt die messtechnisch erfasste Kennlinie des reinen Gebläses ohne jegliche Anbauteile. Erwartungsgemäß bildet der Verlauf der Totaldruckerhöhung im relevanten Volumenstrombereich kein lokales Maximum aus. Es ist ein stetig fallender Verlauf erkennbar, was eine spätere druckbasierte Leistungsregelung der zentralen Gebläseeinheit erleichtern kann, s. hierzu auch **Kap. 2.5.4**.

Der Brennluftvordruck in der Verteilleitung wurde auf 80 mbar gesetzt. Der Betriebspunkt des Gebläses ergibt sich zu 2.500 Bm<sup>3</sup>/h und liegt damit energetisch sehr vorteilhaft nahe am maximalen Wirkungsgrad des Gebläses.

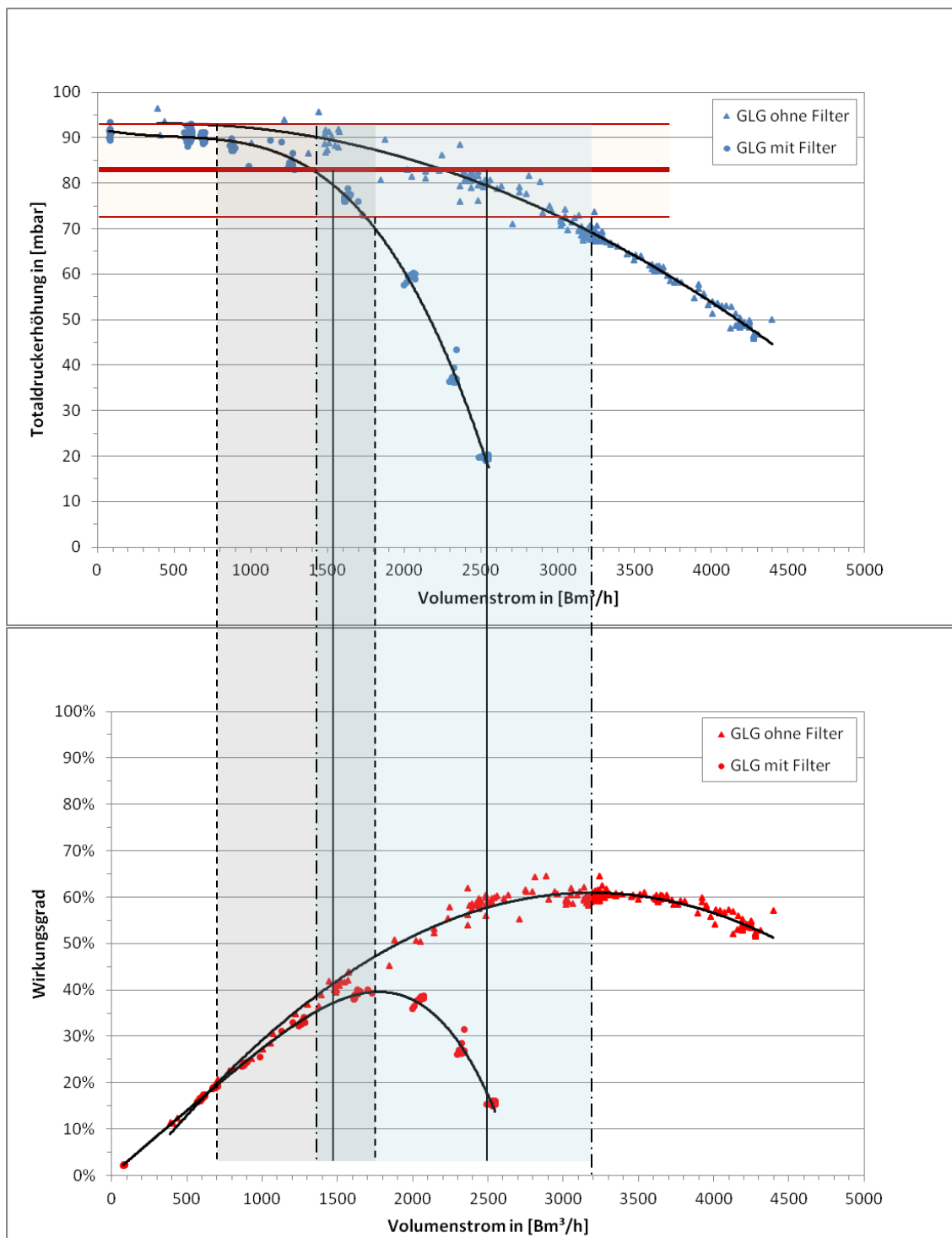
Limitiert man zusätzlich die erlaubten Druckschwankungen auf +/- 10 mbar, um ein zu starkes Verschieben des Luftverhältnisses an Brennern ohne pneumatische Verbundregelung zu vermeiden, ergibt sich ein nutzbarer Volumenstrombereich von etwa 1.500 – 3.150 Bm<sup>3</sup>/h. Dieser Bereich zeichnet sich zum einen durch einen stetig fallenden Bereich der Gebläsekennlinie aus, was aus regelungstechnischer Sicht vorteilhaft ist, und zum anderen durch einen relativ hohen mittleren Wirkungsgrad. Insgesamt erscheint das gewählte Gebläse damit als sehr gut geeignet für den Einsatz als Grundlastgebläse innerhalb einer zentralen Gebläseeinheit.



**Bild 43:** Kennfeld und Wirkungsgradverlauf bei Nenndrehzahl (PILLER Typ 3246MN80225, ohne weitere Anbauteile)

Da das Gebläse bereits lange im industriellen Einsatz war, lag für die Untersuchungen auch der Original-Luftfilter des Gebläses vor. Der Luftfilter wurde nicht gereinigt. Um den Einfluss von staubbeladenen Luftfiltern bewerten zu können, wurden alle Untersuchungen einmal mit und einmal ohne den saugseitig installierten Originalluftfilter durchgeführt. Zum direkten Vergleich sind die Ergebnisse beider Versuchsreihen in **Bild 44** dargestellt.

Wie vermutet hat die Filterbeladung einen erheblichen Einfluss auf die energetische Effizienz des Gebläses.



**Bild 44** Kennfeld bei Nenndrehzahl, mit und ohne staubbeladenem Luftfilter (PILLER Typ 3246MN80225, ohne weitere Anbauteile)

Da die vom Gebläse erzeugte Totaldruckerhöhung bei einem stark staubbeladenen Filter zu großen Teilen bereits benötigt wird um den Druckverlust im saugseitigen Filter zu überwinden, verschiebt und reduziert sich der nutzbare Volumenstrombe-

reich entsprechend. Unter Beibehaltung der o.g. Randbedingungen verschiebt sich der angestrebte Betriebspunkt damit von ca. 2.500 Bm<sup>3</sup>/h auf nur noch 1.520 Bm<sup>3</sup>/h. Der nutzbare Volumenstrombereich verringert sich von 1.350 – 3.200 Bm<sup>3</sup>/h auf 700 -1.750 Bm<sup>3</sup>/h.

Außerdem sinkt der Wirkungsgrad im Betriebspunkt von 58 % auf 38 %. Auch die mittlere Effizienz im nutzbaren Bereich verringert sich entsprechend.

Die übliche, und nur mit erheblichem Wartungsaufwand zu vermeidende, Verschmutzung der saugseitigen Filter an Brennluftgebläsen reduziert deren Effizienz damit erheblich.

### 2.5.3 Messtechnische Untersuchung des Regelgebläses

Als Regelgebläse wurde ein Drehkolbengebläse des Typs J&H RV52/53 gewählt. Die Vermessung des Gebläses konzentrierte sich auf den untersten Teillastbereich, d.h. bei sehr geringen Drehzahlen und Totaldruckerhöhungen von 20-100 mbar. Dieser Betriebsbereich ist für diese Gebläse unüblich, weshalb hierfür bei J&H kaum Erfahrungen und nur sehr begrenzt Daten vorlagen.

**Bild 45** stellt den Ausschnitt des Teils des Gebläsekennfelds dar. Bei Drehkolbengebläsen wird der Ansaugvolumenstrom als Funktion der Druckerhöhung abgebildet. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den Kennfeldern des vermessenen Radialgebläses, werden dieselben Messwerte in **Bild 46** noch einmal in der für Radialgebläse üblichen Weise dargestellt. Hierbei wird die Druckerhöhung als Funktion des Volumenstroms abgebildet.

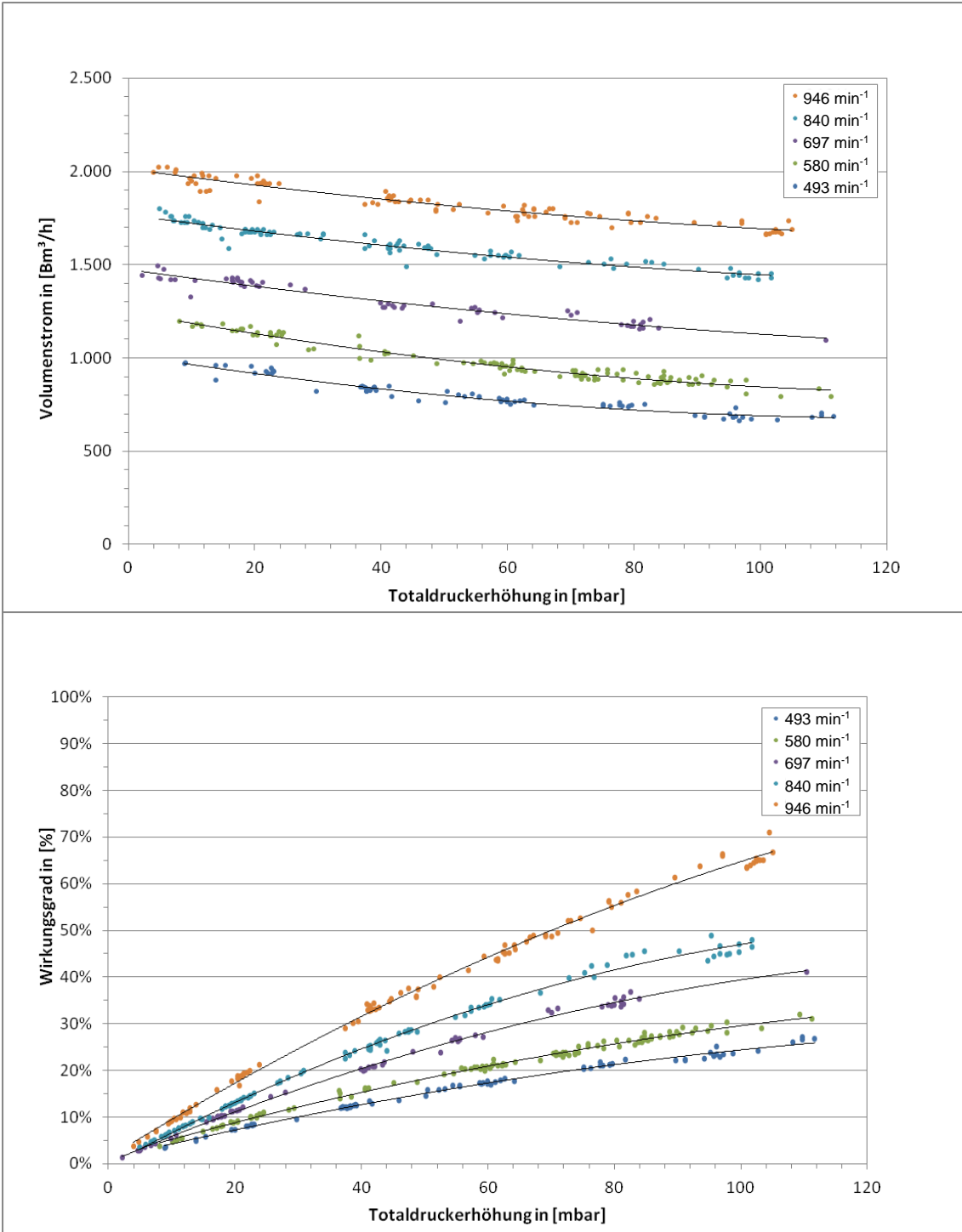
Es wird deutlich, dass unter den für eine zentrale Brennluftversorgung oben definierten Randbedingungen (Brennluftvordruck in der zentralen Verteilleitung 80 mbar +/- 10 mbar) für jede konstante Drehzahl nur ein sehr schmaler Volumenstrombereich nutzbar wäre. Für eine Gebläsedrehzahl von 493 min<sup>-1</sup> beispielsweise ergibt sich ein Volumenstrom von 725 Bm<sup>3</sup>/h im angestrebten Betriebspunkt (bei 80 mbar). Bereits Volumenstromänderungen von +/-25 Bm<sup>3</sup>/h würden jedoch dazu führen, dass der geforderte Druckerhöhungsbereich nicht mehr eingehalten werden kann. Wie in **Kap. 2.3.4** bereits beschrieben, ist dies der Grund, warum sich Drehkolbengebläse alleine nicht zur Brennluftversorgung von Industrieöfen eignen. Die Messwerte zeigen andererseits aber noch einmal gut die lineare Drehzahlabhängigkeit des geför-



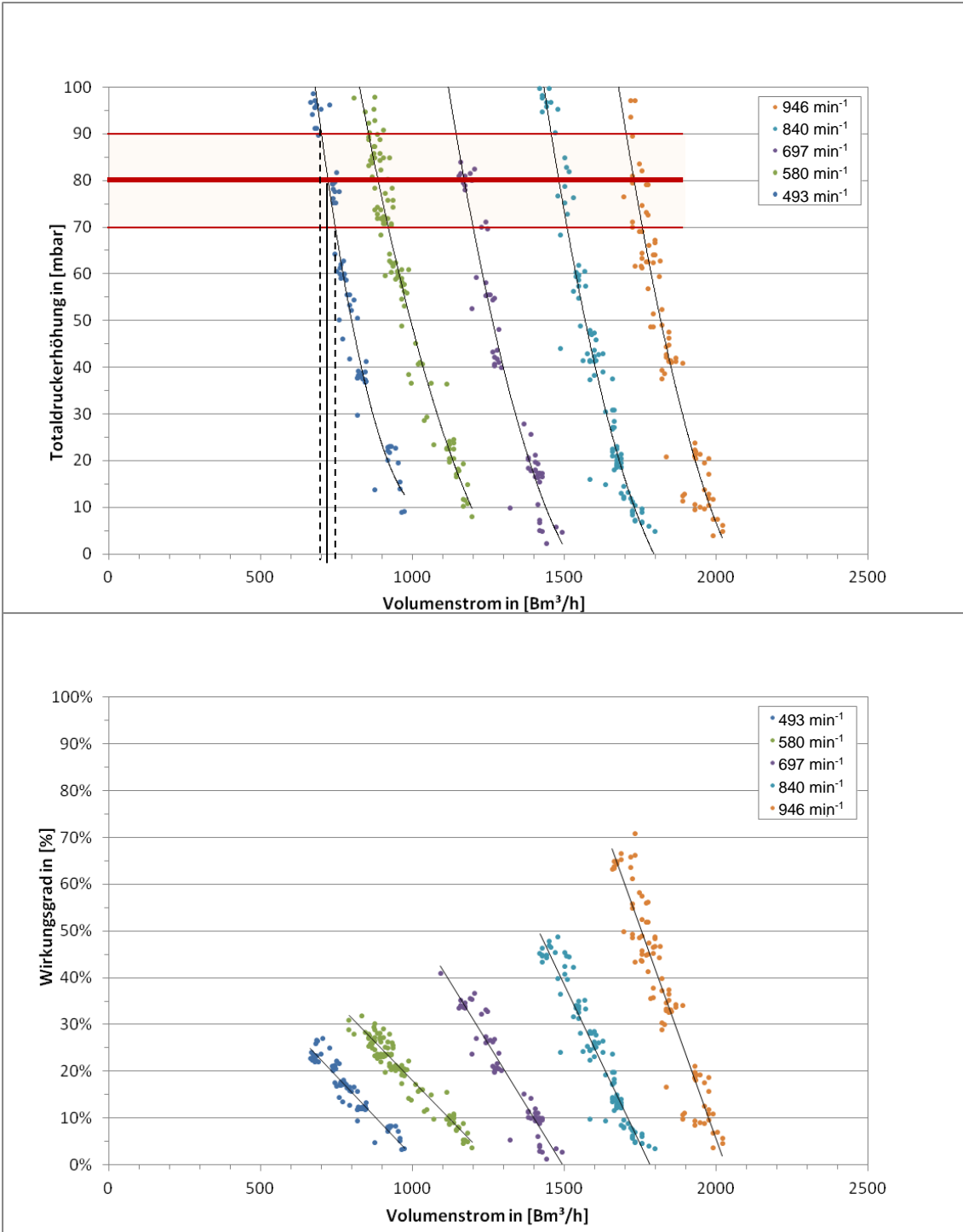
erten Volumenstroms. Durch eine Drehzahlerhöhung von beispielsweise  $493 \text{ min}^{-1}$  auf  $946 \text{ min}^{-1}$  kann der geförderte Volumenstrom von  $725 \text{ Bm}^3/\text{h}$  auf  $1.725 \text{ Bm}^3/\text{h}$ , bei gleichbleibender Druckerhöhung von  $80 \text{ mbar}$ , angehoben werden.

Dieser lineare Zusammenhang für konstante Druckerhöhungen ist in **Bild 47** für die angestrebte Druckerhöhung von  $80 \text{ mbar}$  noch einmal gesondert dargestellt, ebenso wie die Abhängigkeit des Gebläsewirkungsgrads vom geförderten Volumenstrom (bei konstanter Druckerhöhung).

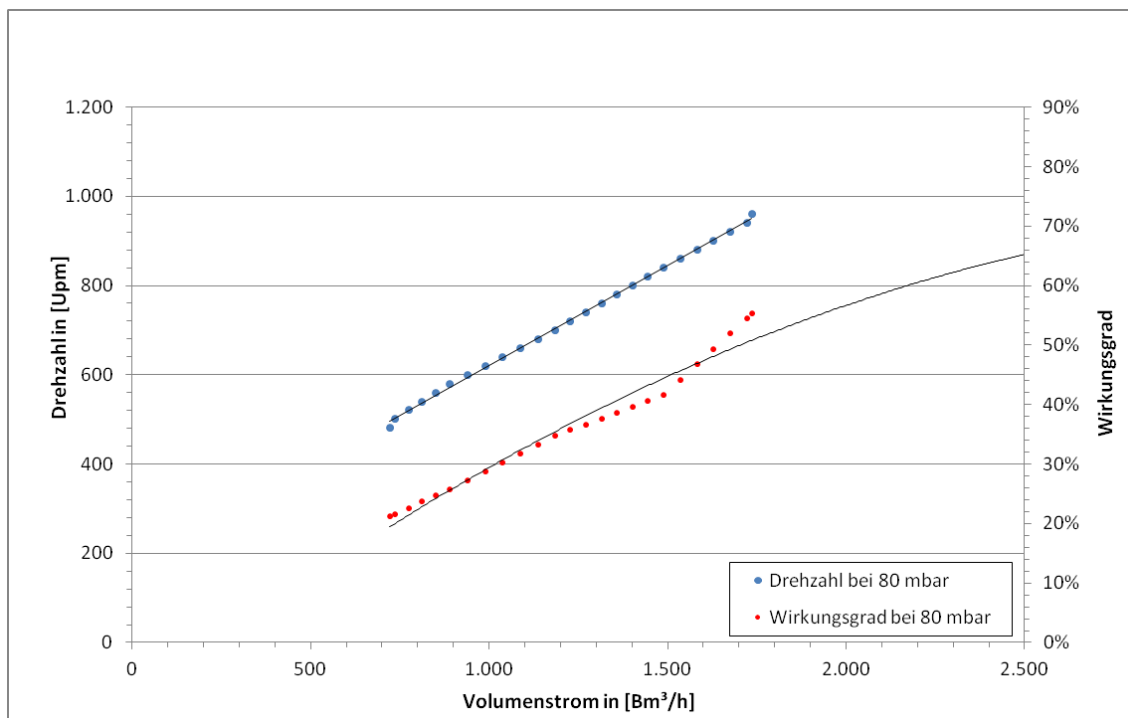
Wie erwartet fällt die Effizienz des Drehkolbengebläses bei sehr geringen Drehzahlen deutlich ab. Dies ist auf funktionsbedingte interne Leckagen dieser Gebläse zurückzuführen, welche mit sinkenden Fördermengen immer stärker ins Gewicht fallen. Die Untersuchung und Bewertung, wie stark sich dieser Effekt bei der Verwendung eines Drehkolbengebläses als Regelgebläse innerhalb einer zentralen Gebläseeinheit auf die Gesamteffizienz auswirkt, erfolgt in **Kap. 2.6**.



**Bild 45:** Kennfeld und Wirkungsgrad für fünf sehr niedrige Drehzahlen in für Drehkolbengebläse typische Darstellung:  $V(p_t)$ ,  $\eta(p_t)$ , (J&H Typ RV52/53)



**Bild 46:** Kennfeld und Wirkungsgradverlauf für fünf sehr niedrige Drehzahlen in für Radialgebläse typischer Darstellung:  $p_t(V)$ ,  $\eta(V)$ , (J&H Typ RV52/53)



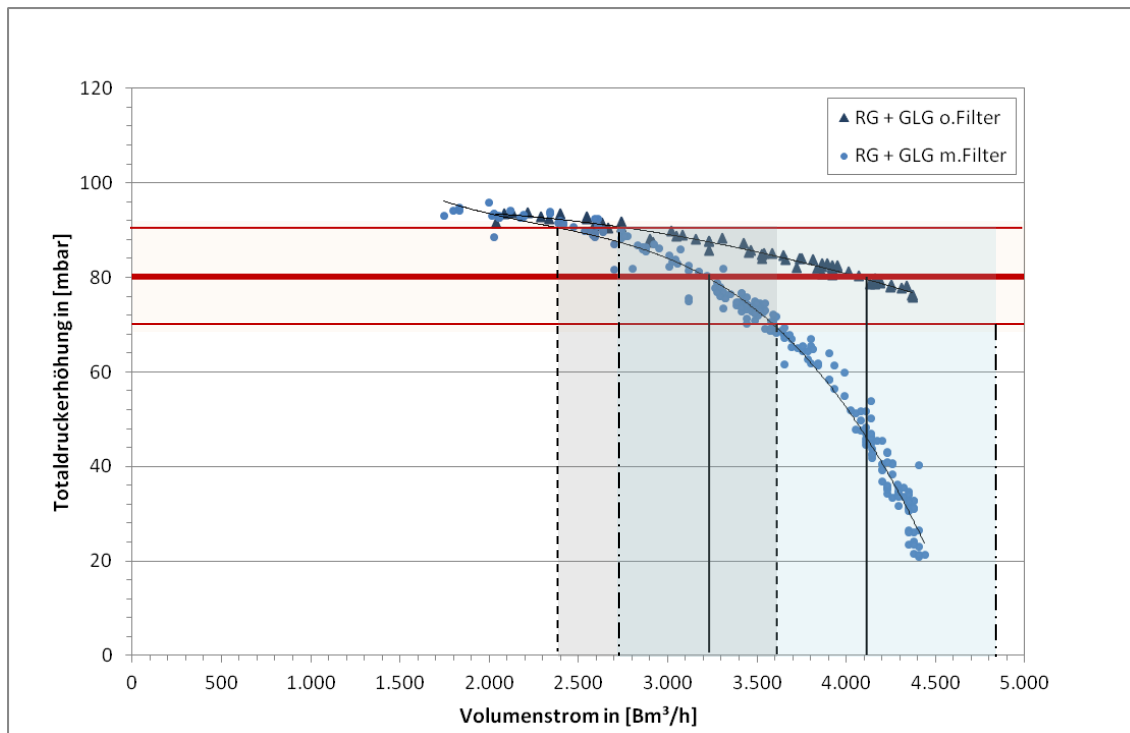
**Bild 47:** Drehzahl und Wirkungsgrad in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms bei einer konstanten Totaldruckerhöhung von  $p_t = 80 \text{ mbar}$  (J&H Typ RV52/53)

#### 2.5.4 Messtechnische Untersuchung der neuen zentralen Gebläseeinheit

Nach der Vermessung der beiden wurden beide Gebläse zu einer Gebläseeinheit gekoppelt und zusammen vermessen.

Auch hier spiegelt sich der starke Einfluss saugseitiger Luftfilter bzw. deren Staubbeladungsgrad im Kennfeld und der Gebläseeffizienz wider, weshalb die folgenden Untersuchungen alle jeweils einmal mit und einmal ohne einen saugseitigen Filter am Grundlastgebläse durchgeführt wurden.

Für beide Varianten sind die Gesamt-Kennlinien in **Bild 48** dargestellt. In der dargestellten Betriebssituation arbeitete das Grundlastgebläse mit seiner Nenndrehzahl ( $2.945 \text{ min}^{-1}$ ) und das Regelgebläse mit einer Drehzahl von  $946 \text{ min}^{-1}$ . Auch hier ist, analog zu **Kap. 2.5.2**, sowohl eine Verschiebung des Betriebspunktes bei 80 mbar Druckerhöhung, als auch eine Einschränkung des nutzbaren Volumenstrombereichs bei einem Betrieb mit staubbeladenem Filter zu erkennen.



**Bild 48:** Kennlinien der Gebläseeinheit mit und ohne saugseitigem Luftfilter am GLG (GLG bei Nenndrehzahl, RG mit  $946 \text{ min}^{-1}$ )

Für beide Fälle und unter allen Betriebsbedingungen konnten jedoch keine negativen Wechselwirkungen aufgrund der beiden unterschiedlichen Gebläsetypen festgestellt werden. Der Betrieb war in allen Betriebssituationen stabil, und es konnten keine auffälligen (Gassäulen-) Schwingungen festgestellt werden.

Darüber hinaus zeigten die Gesamt-Kennlinien der so gebildeten zentralen Gebläseeinheit in keiner der untersuchten Konstellationen lokale Maxima (s. **Bild 48** und **Bild 49**). Durch die stetig fallenden Kennlinienverläufe im relevanten Betriebsbereich wird eine Regelung der Regelgebläsedrehzahl auf Basis des Drucks in der gemeinsamen Verteilleitung somit grundsätzlich möglich sein. Auch wenn die Entwicklung eines Regelungssystems nicht Teil des aktuellen Forschungsvorhabens ist, so war die Sicherstellung dieser Regelungsmöglichkeit doch Kernaufgabe der durchgeführten Prüfstandversuche.

Ein weiteres Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung eines theoretischen Ansatzes zur korrekten modelltechnischen Abbildung des Zusammenwirkens von Radial- und Drehkolbengebläsen als eine zentrale Gebläseeinheit.

Die Untersuchungen zeigten, dass im relevanten Druckbereich von 70 - 90 mbar die von beiden Gebläsen geförderten Volumenströme zu einem Gesamtvolumenstrom

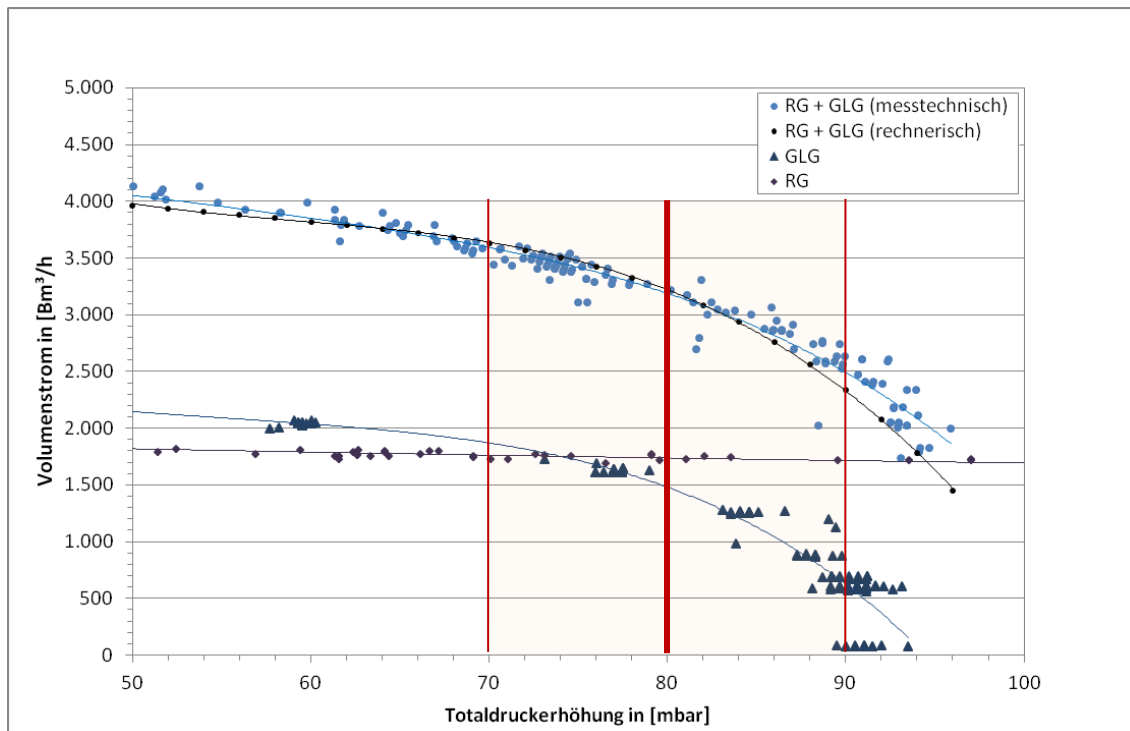
addiert werden können (**Bild 49**). Darüber hinaus bleibt das Drehkolbengebläse als Zwangsförderer in allen hier relevanten Betriebssituationen quasi unbeeinflusst von dem parallel betriebenen Radialgebläse. Drosselungen des Gesamtvolumenstroms beispielsweise gehen nahezu ausschließlich zu Lasten des Radialgebläses, was zu einer Druckanhebung entsprechend der Radialgebläsekennlinie führt. Die resultierende Druckanhebung führt aufgrund der Charakteristik des Drehkolbengebläses aber wiederum zu keiner nennenswerten Anpassung des von ihm geförderten Volumenstroms. Da die maximal erreichbare Druckerhöhung des Radialgebläses bei ca. 100 mbar liegt, kann dies bei einer extremen Drosselung des Gesamtvolumenstroms bis unter den vom Drehkolbengebläse geförderten Volumenstrom sogar dazu führen, dass Teile des vom Drehkolbengebläse geförderten Volumenstroms rückwärts durch das laufende Radialgebläse gefördert werden. Dies ist jedoch aus verschiedenen Gründen dringend zu vermeiden, da beispielsweise ein druckbasiertes Regulationssystem hierdurch in einen instabilen Zustand überführt werden kann. Ein ausreichender Abstand von der Pumpgrenze des Radialgebläses ist daher immer einzuhalten.

Analog verhält sich das Zusammenspiel der beiden Gebläsetypen auch bei einer Erhöhung der Brennlufatabnahme.

Das Drehkolbengebläse kann damit in ausreichend genauer Näherung für die hier relevanten Betriebssituationen innerhalb der zentralen Gebläseeinheit als unbeeinflusster Zwangsförderer angenommen werden. Die hierbei entstehenden Abweichungen liegen üblicherweise bei  $< 2\%$  und erreichen in Grenzsituation max.  $6\%$ .

Die in **Kap. 2.5.2** detailliert beschriebene typische Eigenschaft von Radialgebläsen, dass Volumenstromschwankungen in einem relativ weiten Bereich nicht unmittelbar zu kritischen Veränderungen des Druckniveaus führen, werden damit Teil der Charakteristik der zentralen Gebläseeinheit. Durch diesen „Pufferbereich“ der Radialgebläse können Schwankungen in der Gesamtvolumenstromabnahme intern temporär von diesen aufgefangen werden, bis das Regelgebläse auf Basis des sich leicht geänderten Druckniveaus seine Drehzahl angepasst hat und der angestrebte Gesamtbetriebspunkt wieder erreicht wird.

Die positiven Eigenschaften beider Gebläsetypen lassen sich somit in einer zentralen Gebläseeinheit kombinieren und nutzen.



**Bild 49:** Vergleich der summierten Einzelvolumenströme von Radial- und Drehkolbengebläse mit dem messtechnisch erfassten Gesamtvolumenstrom (GLG: Nenndrehzahl; RG: 946 min<sup>-1</sup>)

## 2.6 Energetische Bewertung

Zur energetischen Bewertung der geplanten neuen zentralen Brennluftversorgung für Industrieöfen auf Basis einer aus Radial- und Drehkolbengebläsen kombinierten Gebläseeinheit gegenüber einer heute üblichen dezentralen Brennluftversorgung auf Basis von einzelnen Radialgebläsen wurde das eigens entwickelte Berechnungstool (s. **Kap. 2.1**) um die Messdaten und Erkenntnisse aus den Prüfstandversuchen erweitert.

So ist es möglich für beide Versorgungsvarianten (zentral und dezentral) die Stromaufnahme und damit die elektrische Leistungsaufnahme aller Gebläse einzeln aber auch in Kombination als zentrale Gebläseeinheit betriebspunktabhängig zu berechnen. Durch zeitliche Aufsummierung der Leistungsdaten können so Gesamtenergieverbräuche für verschiedene Szenarien berechnet werden. Berücksichtigt werden hierbei sowohl die im Rahmen der Prüfstandversuche ermittelten gebläse- und betriebssituationsspezifischen Wirkungsgrade (s. **Kap. 2.5.2** und **2.5.3**), als auch die in

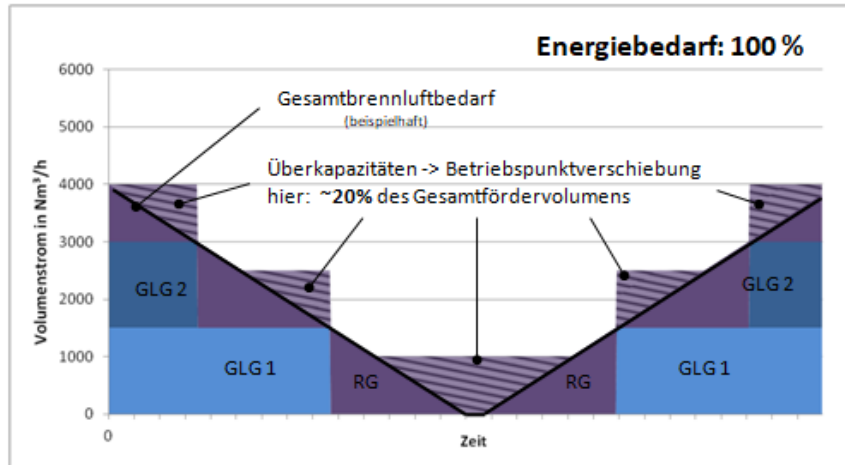
diesem Rahmen untersuchten Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Drehkolben- und Radialgebläsen innerhalb einer Gebläseeinheit (**Kap. 2.5.4**).

Die ersten energetischen Bewertungen wurden anhand theoretischer Anforderungsprofile analog zu **Kap. 2.3.2** durchgeführt, um die grundlegenden Kriterien zur Gebläseauswahl noch einmal fundiert energetisch zu überprüfen. Anschließend wurden die auf realen Betriebsdaten erstellten drei Szenarien „real“, „max.“ und „homogen“ (s. **Kap. 2.2**) vollständig mit dem erweiterten Berechnungstool, jeweils einmal mit der bestehenden dezentralen Brennluftversorgung und einmal mit der neuen zentralen Gebläseeinheit, vollständig simuliert und der jeweilige Gesamtbedarf an elektrischer Energie der Gebläse ermittelt.

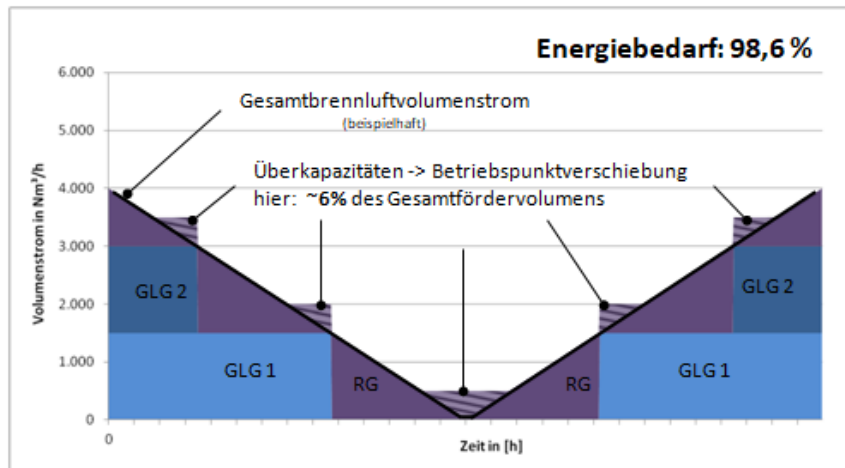
**Bild 50** stellt exemplarisch die Ergebnisse zur Deckung eines theoretischen Brennluftbedarfsprofils dar. Berechnet wurden drei verschiedene Konstellationen aus bis zu zwei Radial- bzw. Grundlastgebläsen und einem Roots- bzw. Regelgebläse. Die drei Varianten unterscheiden sich ausschließlich durch den Regelbereich des Regelgebläses, was zu mehr oder weniger großen Überkapazitäten führt. Während in **Kap 2.2** diese Überkapazitäten als reine Verluste bewertet wurden, können nunmehr, durch das erweiterte Berechnungstool, eine entsprechende Betriebspunktverschiebung der Grundlastgebläse sowie die betriebspunktabhängigen Gebläsewirkungsgrade berücksichtigt werden.

Dies hat zur Folge, dass beispielsweise eine Absenkung der minimalen Fördermenge des Regelgebläses von 1.000 Bm<sup>3</sup>/h (**Bild 50**, oben) auf 500 Bm<sup>3</sup>/h (mittig) zwar zu einer Reduzierung der Überkapazität von ca. 20 % auf ca. 6 % führt, der Gesamtenergiebedarf jedoch nur um 1,4 % sinkt, da das Regelgebläse dadurch über weite Bereiche in einem erheblich schlechteren Wirkungsgradbereich betrieben wird, was einen großen Teil dieser Einsparungen kompensiert. Der mittlere Wirkungsgrad des Regelgebläses sinkt durch die veränderten Betriebsbedingungen um über 10 %-Punkte.

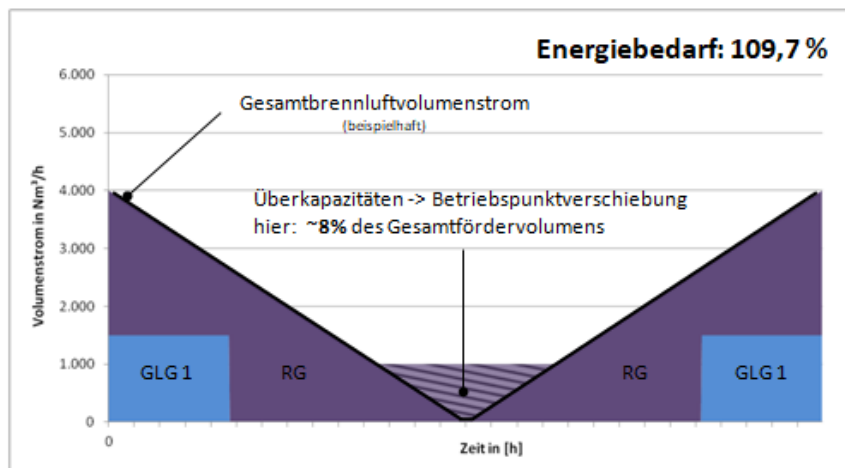




Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördervolumenstrom  
 Regelgebläse: 1.000 – 1.500 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom



Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördervolumenstrom  
 Regelgebläse: 500 – 1.500 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom



Je Grundlastgebläse: 1.500 Nm<sup>3</sup>/h Nennfördervolumenstrom  
 Regelgebläse: 1.000 – 2.650 Nm<sup>3</sup>/h (min. – max.) Fördervolumenstrom

**Bild 50:** Einfluss der Leistungsverhältnisse zwischen Drehkolbengebläse und Radialgebläse auf die energetische Gesamteffizienz.

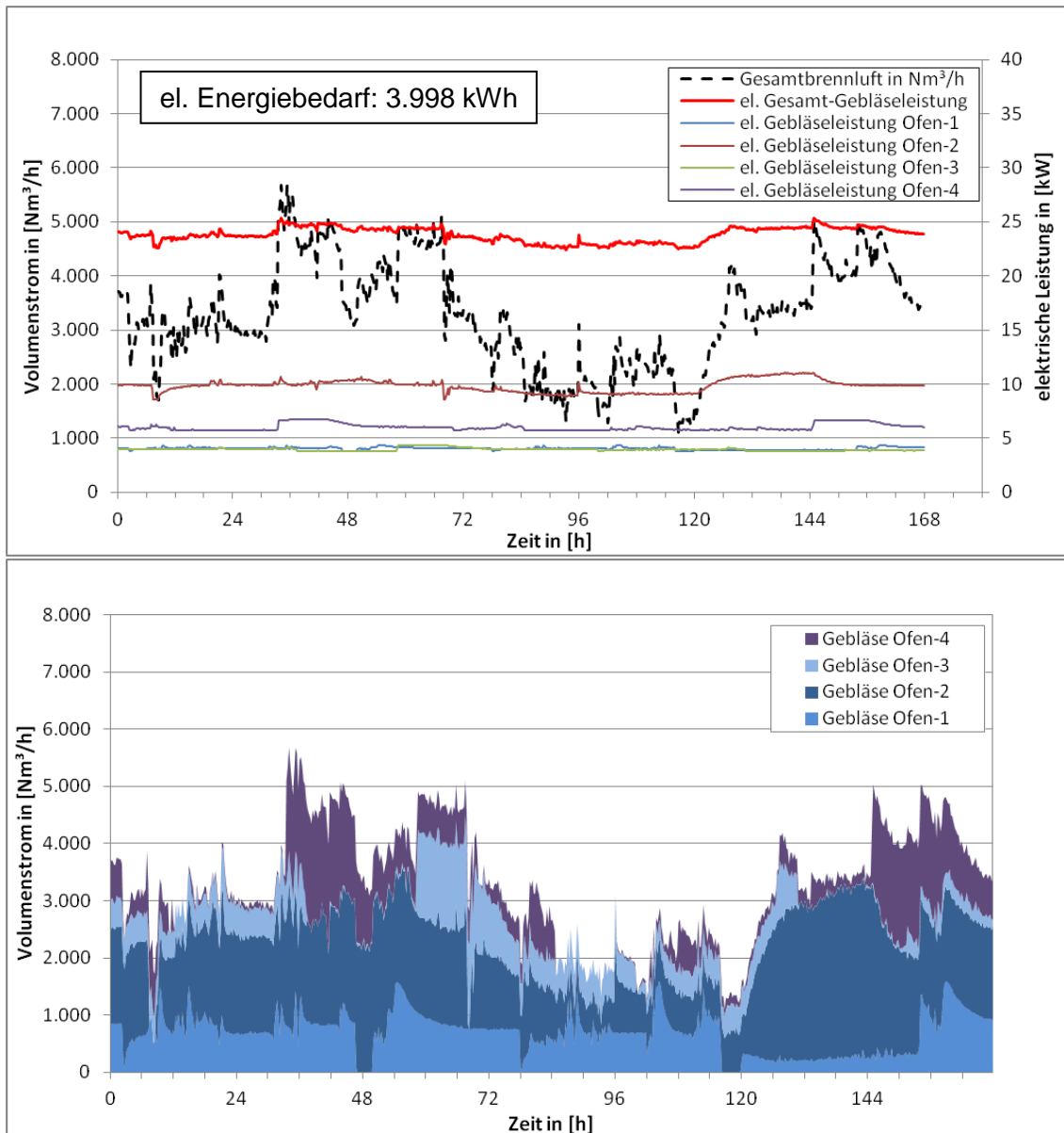
In der dritten Konstellation (**Bild 50**, unten) wurde gegenüber der ersten der maximale Fördervolumenstrom erhöht. Dies führt wieder dazu, dass die Überkapazitäten erheblich reduziert werden. Trotzdem steigt in diesem Fall der Gesamtenergiebedarf. Dies ist auf zwei Effekte zurückzuführen. Zum einen wird das Regelgebläse auch hier durch Veränderungen des Teillastanteils im Mittel 8 %-Punkte niedrigeren mittleren Wirkungsgrad betrieben. Zum anderen führt die Anhebung des maximalen Fördervolumenstroms dazu, dass die im Mittel energetisch effizienteren Grundlastgebläse deutlich weniger zugeschaltet werden, was die erhofften Einsparungen mehr als kompensiert.

Das Beispiel zeigt, wie komplex die energetisch optimale Auslegung einer zentralen Gebläseeinheit aufgrund diverser, teils gegenläufiger Effekte und Abhängigkeiten ist. **Mit dem entwickelten Berechnungstool steht nun jedoch ein Werkzeug zur Verfügung um verschiedenste Konstellationen aus bis zu drei Radial- bzw. Grundlastgebläsen und einem Drehkolben- bzw. Regelgebläse im Vorfeld zu untersuchen.** Hierbei können durch programminterne Skalierungen auch Gebläse unterschiedlichster Leistungsklassen berücksichtigt werden, solange unterstellt werden kann, dass sie sich bezogen auf den jeweiligen maximalen Fördervolumenstrom identisch zu den messtechnisch untersuchten Gebläsen verhalten.

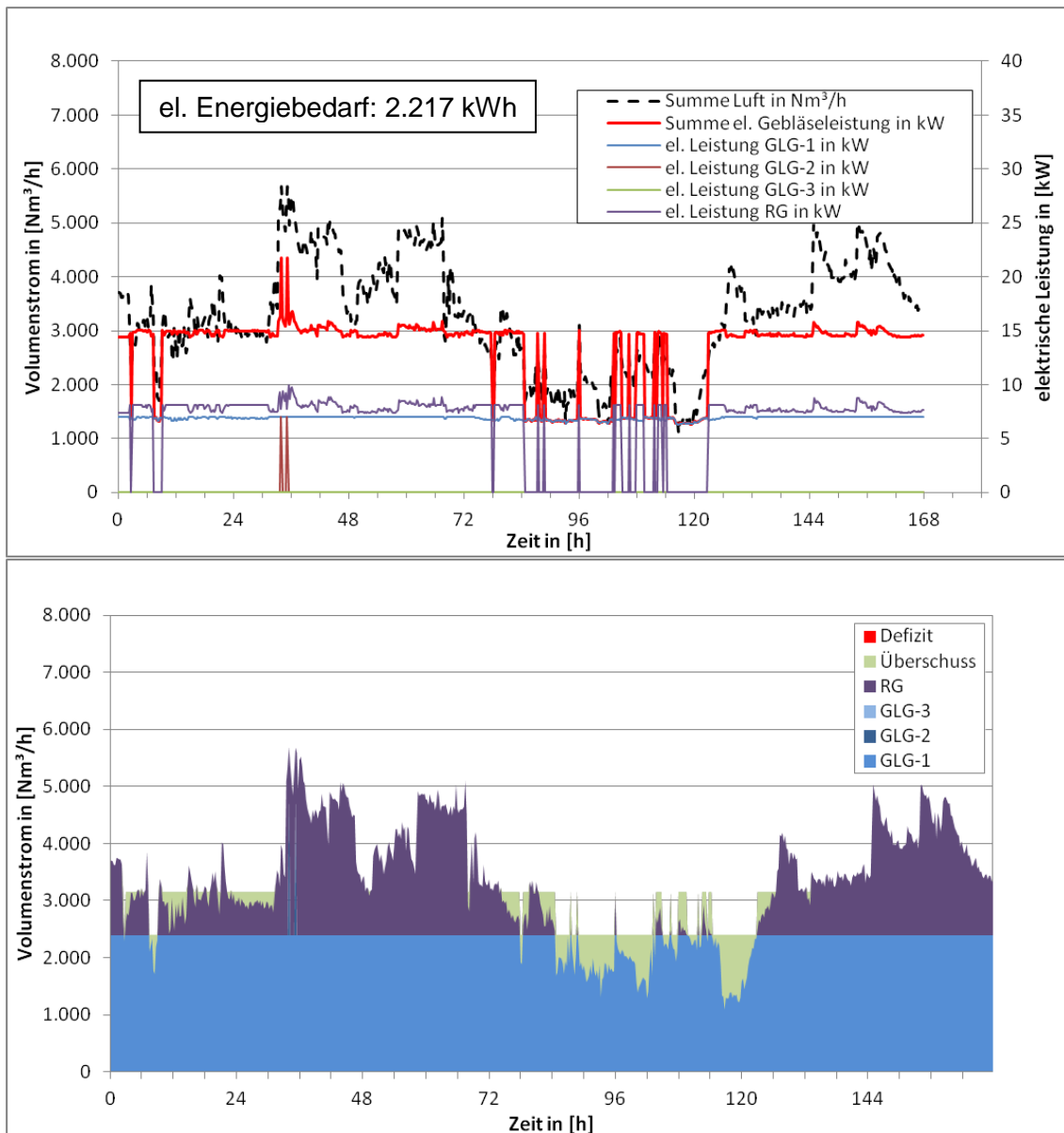
Außerdem kann das Berechnungstool zur energetischen Bewertung verschiedener Gebläsekonstellationen anhand beliebiger Betriebs- und Anforderungsdaten genutzt werden. Für das in **Kap. 2.2** definierte Szenario „real“, welches auf realen messtechnisch erfassten Betriebsdaten von vier verschiedenen Industrieöfen beruht, zeigt **Bild 51** (oben) die so berechneten elektrischen Leistungsaufnahmen der Einzelgebläse im konventionellen, dezentralen Betrieb, sowie die sich hieraus ergebende Gesamtleistungsaufnahme und den Gesamtvolumenstrom der Brennluft. Die von den jeweiligen Einzelgebläsen geförderten Volumenströme sind in **Bild 51** unten kumulativ dargestellt.

Das gleiche Szenario, allerdings unter Verwendung einer zentralen Gebläseeinheit, bestehend aus bis zu drei Grundlastgebläsen mit einer Förderleistung von je 2.400 Bm<sup>3</sup>/h im angestrebten Betriebspunkt und einem Regelgebläse mit einem Regelbereich von 750 – 3.200 Bm<sup>3</sup>/h, ist in **Bild 52** dargestellt. Die energetische Einsparung durch den Einsatz einer zentralen Gebläseeinheit gegenüber der konventio-

nellen dezentralen Brennluftversorgung würde in diesem Szenario ca. 45 % betragen.

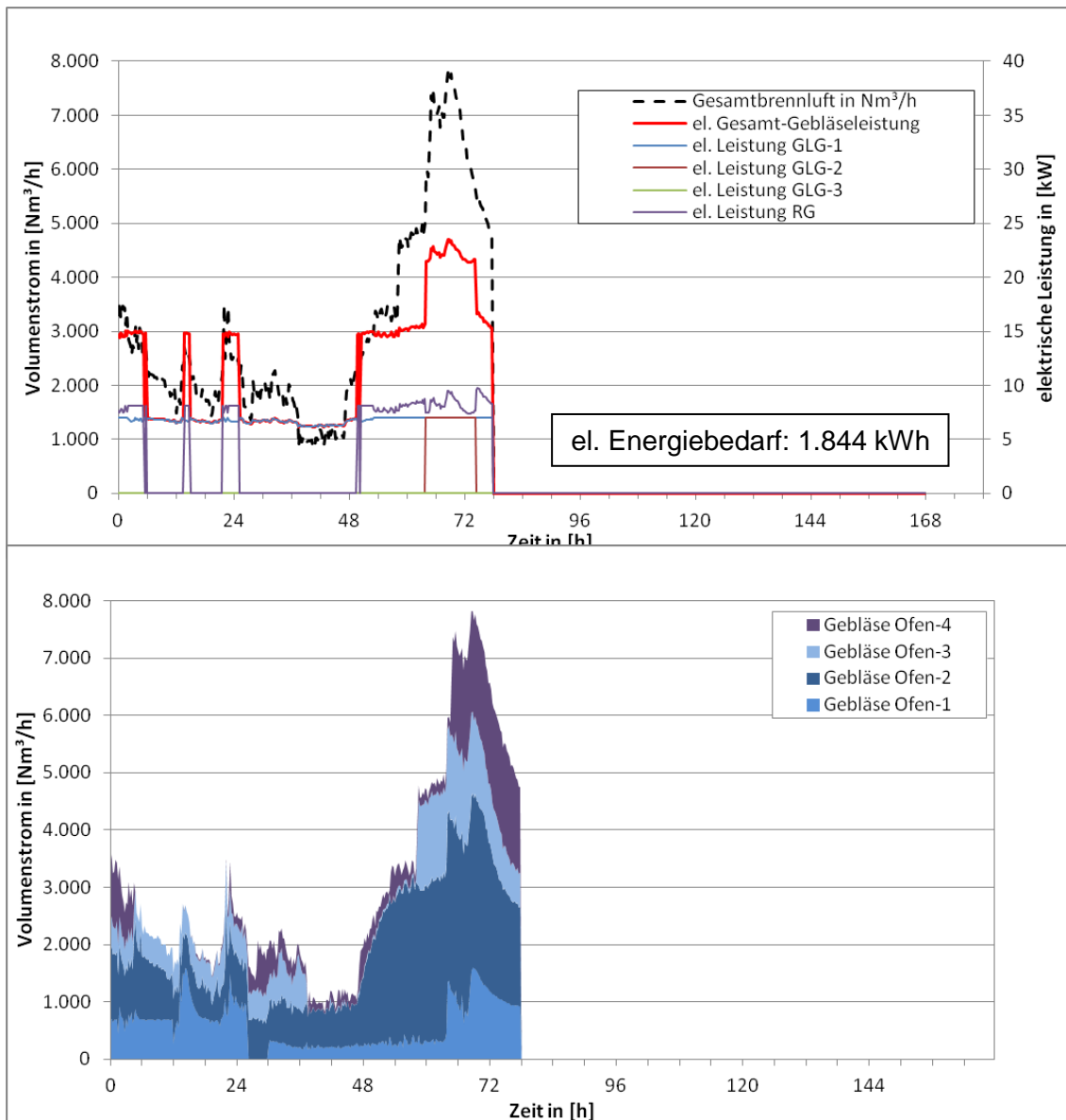


**Bild 51:** Szenario „real“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten)

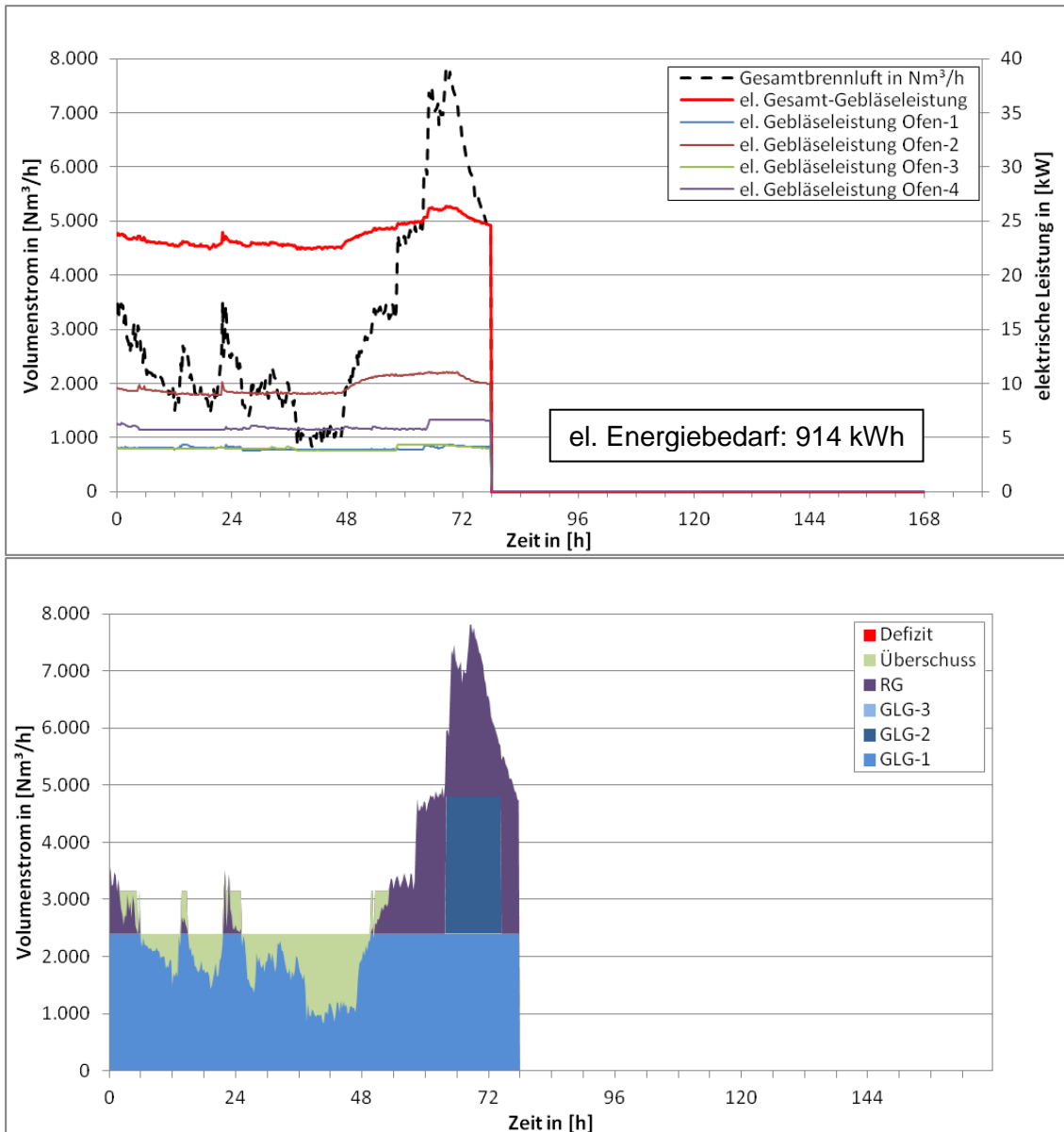


**Bild 52:** Szenario „real“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 45 %

**Bild 53** und **Bild 54** zeigen die entsprechenden Berechnungsergebnisse für das Szenario „max.“. Hier würden die energetischen Einsparungen ca. 50 % betragen.

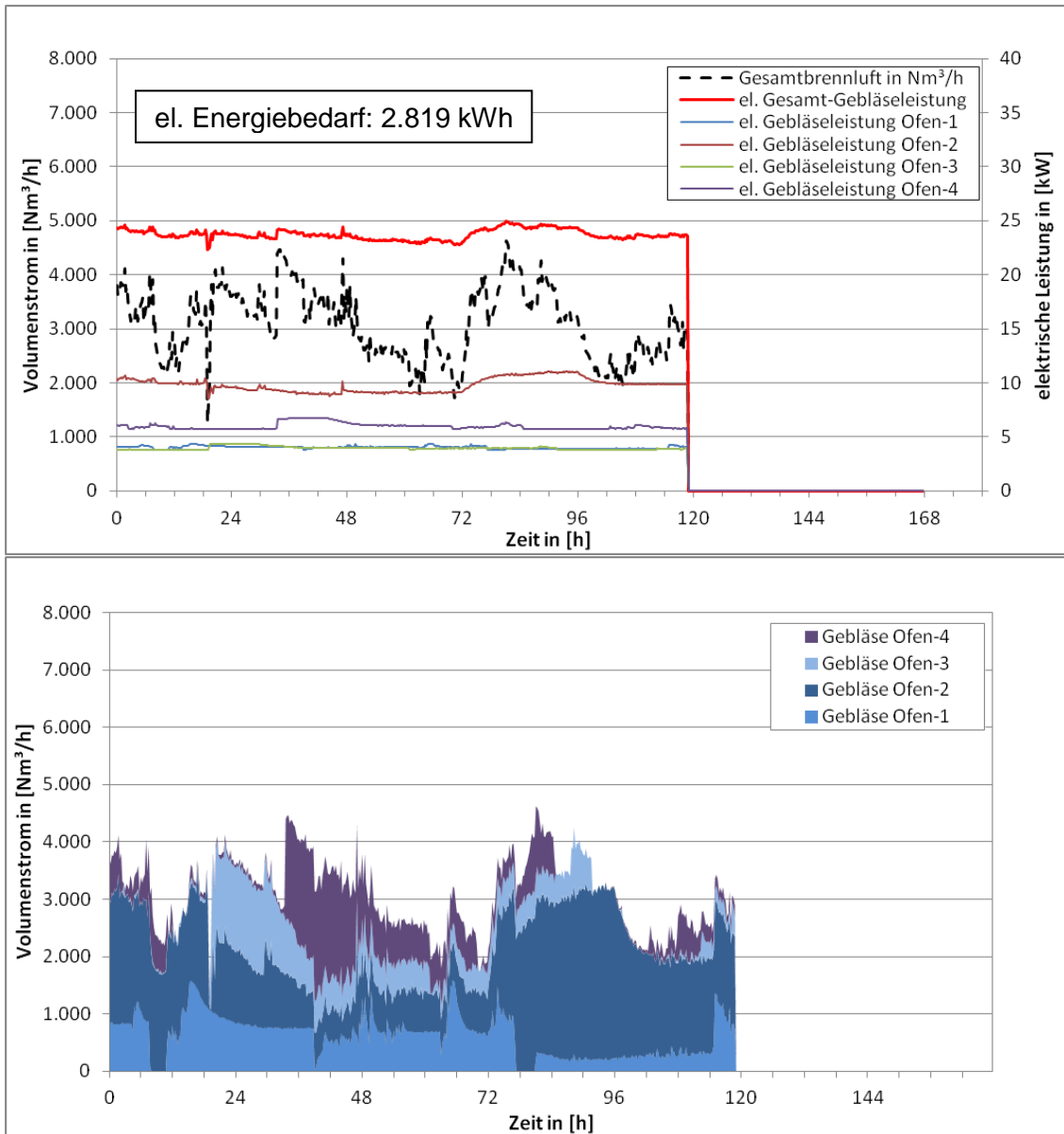


**Bild 53:** Szenario „max.“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten)

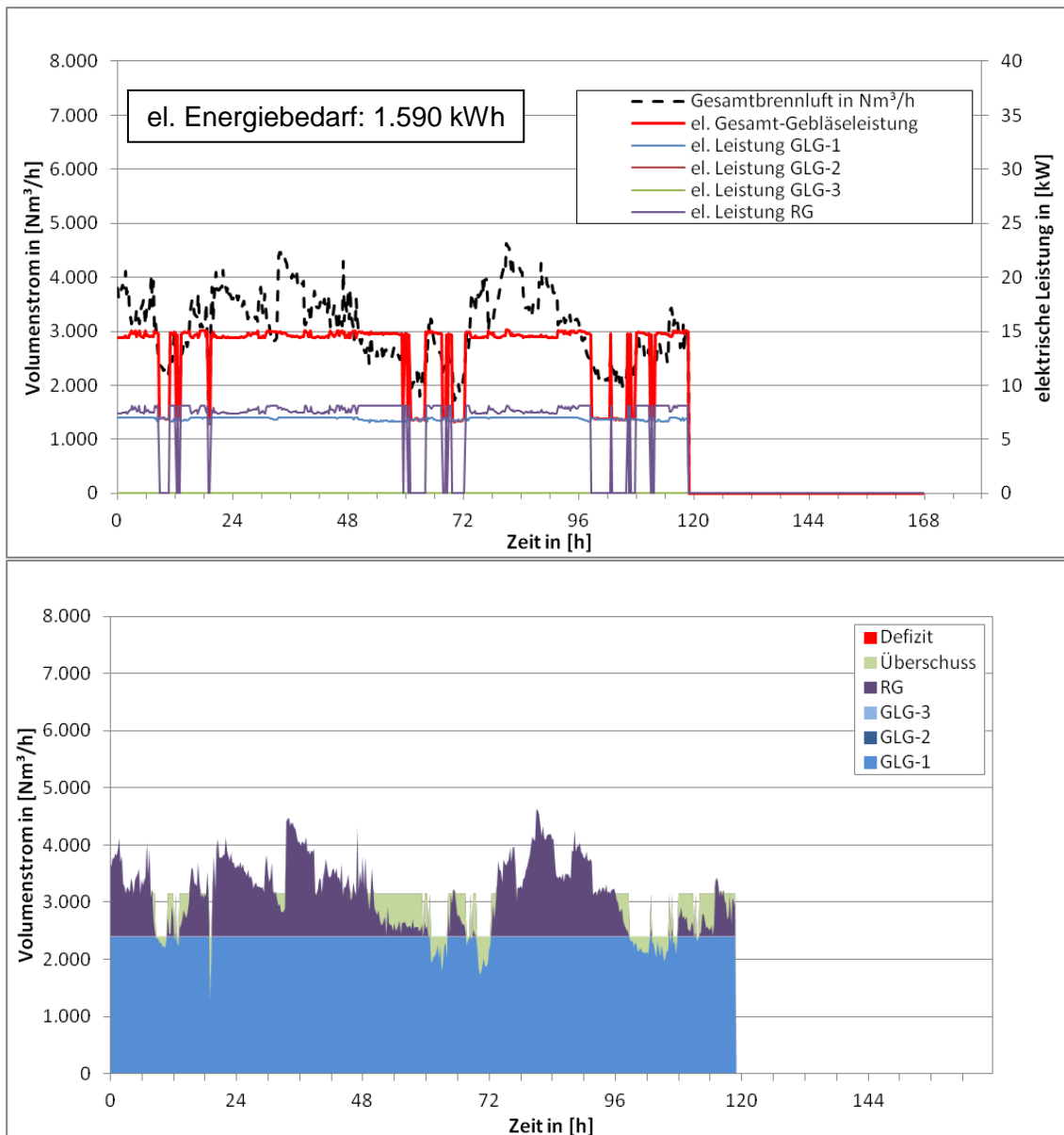


**Bild 54:** Szenario „max.“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 50 %

Für das dritte Szenario „homogen“ sind die entsprechenden Berechnungsergebnisse in **Bild 55** und **Bild 56** dargestellt. In diesem Szenario würden die energetischen Einsparungen ca. 44 % betragen.



**Bild 55:** Szenario „homogen“ mit konventioneller, dezentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und geförderttem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten)



**Bild 56:** Szenario „homogen“ mit neuer, zentraler Brennluftversorgung, elektrischer Leistungsaufnahme und gefördertem Brennluftvolumenstrom (oben) sowie für jedes Einzelgebläse kumulativ (unten), energet. Einsparung: 44 %



## 2.7 Ökologische und ökonomische Betrachtung, Übertragbarkeit der Ergebnisse

Bei einer wirtschaftlichen Betrachtung sind folgende Aspekte maßgeblich, die neben der Senkung der Stromkosten für die Brennluftversorgung von ca. 50% betriebsspezifisch und individuell zu beziffern sind:

- I. Bezugspreis für Strom,
- II. Betriebszeit eines Gebläses pro Jahr  
(Anforderungsprofile der Prozessanlagen),
- III. Nennleistung der existierenden Radialgebläse,
- IV. erforderliche Größe des Drehkolbengebläses,
- V. Rohrleitungsnetz für Aufbau der Gebläsegruppe,
  - a. alter Standort der Gebläse beibehalten,
  - b. neue Gruppe außerhalb der Halle,
- VI. Einhausung mit Schallschutz,
  - a. Fall Va: für Rootsgebläse in der Halle,
  - b. Fall Vb: inklusive Frischluftzufuhr für Gebläsegruppe,
- VII. Regelung für Gebläsegruppe, Anbindung an Ofenregelung.

Für folgende Annahmen

- Strompreises von 10 ct / kWh<sub>el.</sub> und
- Emission von 500 g CO<sub>2</sub> / kWh<sub>el.</sub> bei der Stromerzeugung in Deutschland und
- Stromeinsparung

ergeben sich pro vermiedenen 250.000 kWh<sub>el.</sub> / Jahr, was eine Abschätzung der betrachteten Ofengruppe bei guter Auslastung über das Jahr darstellt, beispielsweise Einsparungen von ca.

- 25.000 € / Jahr und
- 125 t CO<sub>2</sub> / Jahr.

Die gelten Betrachtungen in gleicher Art für Gebläsegruppen in jeglichen Industriebetrieben, wie beispielsweise Thermoprozessanlagen der NE-Eisen-, Glas- oder Keramikindustrie oder Anlagen der chemischen Industrie. Hierbei kann es sich um eine Anzahl von Einzelgebläse handeln, die lediglich das gleiche Medium bei gleicher Temperatur und gleichem Druck befördern und räumlich benachbart sein sollten.

### 3. Fazit

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine möglichst energieeffiziente Brennluftversorgung für Industrieöfen zu entwickeln, insbesondere wenn letztere mit getakteten Mehr-Brenner-Beheizungssystemen ausgestattet sind. Die Besonderheit dieses häufig verwendeten Beheizungssystems ist, dass zur Leistungsreduzierung nur einzelne Brenner abgeschaltet werden, während die verbleibenden mit ihrer jeweiligen Nennleistung weiterbetrieben werden. Hierdurch sinkt der Brennluftbedarf der Gesamtanlage entsprechend. Der Vordruck der Brennluft muss für den sicheren Betrieb der in Betrieb bleibenden Brenner möglichst konstant gehalten werden. Eine Drehzahlanpassung der üblicherweise eingesetzten Radialgebläse ist damit nicht möglich, da dies immer auch zu einer überproportionalen Absenkung des erzeugten Brennluftvordruckes führt.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens konnte gezeigt werden, dass sich Radial- und Drehkolbengebläse zu Gebläseeinheiten koppeln lassen. Bei gleichbleibend hohem Brennluftvordruck kann so eine energieeffiziente Reduzierung des geförderten Brennluftvolumenstroms realisiert werden. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Kopplung der beiden Gebläsetypen zu einer Gebläseeinheit zu keinerlei negativen Wechselwirkungen führt, wie beispielsweise Druckschwingungen, sofern die verwendeten Einzelgebläse für den jeweiligen Anwendungsfall dimensioniert und in einem geeigneten Bereich ihrer Kennlinie betrieben werden. Die Kriterien zur Auswahl der Einzelgebläse bzw. zur Auslegung der Gebläseeinheit wurden im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens entwickelt.

Grundlegend für die Kopplung von Radial- und Drehkolbengebläsen zu einer Gebläseeinheit ist, dass sich beide Gebläsetypen durch grundsätzlich verschiedene Fördercharakteristiken auszeichnen. Bei einer geeigneten Auswahl der verwendeten Einzelaggregate lassen sich die Vorteile des jeweiligen Gebläsetyps auf die gewünschte (Gesamt-)Fördercharakteristik nutzen, während Nachteile durch den jeweils anderen Gebläsetyp kompensiert werden.

Die flachen Kennlinienverläufe von Radialgebläsen verzeihen abrupte Änderungen in der Brennluftabnahme, wie sie bei Brennertaktung oder einer Ofenabschaltung auftreten. Der Vordruck der Brennluft ändert sich dabei moderat. Die damit einhergehende Verschiebung des Betriebspunktes führt aber zu einer entsprechenden Ver-

schlechterung der energetischen Effizienz der Luftförderung. Eine Anpassung der Drehzahl führt zu einer ungewollten, überproportionalen Änderung des erzeugten Brennluftvordrucks.

Drehkolbengebläse hingegen besitzen sehr steile Kennlinienverläufe. Sie gelten daher auch als „Zwangsförderer“. Änderungen in der Brennluftabnahme würden durch diese Fördercharakteristik schnell zu nicht tolerierbaren Brennluftvordruckschwankungen führen, was den sicheren Betrieb der Gesamtanlage gefährden kann. Wie bei allen Zwangsförderern kann der geförderte Luftstrom hier jedoch grundsätzlich über die Gebläsedrehzahl angepasst werden, ohne den erzeugbaren Vordruck wesentlich zu beeinflussen. Allerdings müssten diese Drehzahlanpassungen quasi verzögerungsfrei erfolgen, um kritische Druckschwankungen sicher vermeiden zu können. Da eine verzögerungsfreie Drehzahlregelung technisch nicht realisierbar ist, eignet sich dieser Gebläsetyp damit nicht als Einzelgebläse zur Brennluftversorgung des o.g. Beheizungssystems. Grundsätzlich ermöglicht er durch seine beschriebene Fördercharakteristik aber auf geänderte Abnahmemengen durch Drehzahlanpassung zu reagieren und dabei den erzeugten Vordruck trotzdem weiterhin konstant zu halten.

Durch die Kombination der beiden Gebläsetypen zu einer Gebläseeinheit lassen sich die positiven Aspekte beider Typen nutzen und die negativen kompensieren.

Fördern beispielsweise jeweils ein Radial- und ein Drehkolbengebläse als Einheit in ein gemeinsames Brennluftverteilstück, so konnte gezeigt werden, dass durch die Zwangsförderer-Charakteristik des Drehkolbengebläses Änderungen in der Gesamtbrennluftabnahme fast ausschließlich zu Änderung des Fördervolumenstroms des Radialgebläses führen. Dies hat eine entsprechende, moderate Änderung des erzeugten Brennluftvordrucks zur Folge sowie typischerweise eine Verschlechterung der Energieeffizienz des Radialgebläses durch die Verschiebung des Betriebspunktes weg von seinem Optimum. Die resultierende Änderung im Brennluftvordruck entspricht dabei in etwa der, wie sie sich bei einem Einzelbetrieb des Radialgebläses (wie heute üblich) ergeben würde, und ist somit unkritisch in Bezug auf einen sicheren Anlagenbetrieb.

Anders als im Einzelbetrieb der Gebläse kann durch die Kombination von Radial- und Drehkolbengebläse allerdings auf Änderungen der Abnahmemenge reagiert werden. Durch Veränderung der Drehzahl des Drehkolbengebläses lässt sich des-

sen, vom Anlagengegendruck nahezu unabhängige, Fördermenge an den geänderten Gesamtbrennluftbedarf anpassen. Durch diese Anpassung der Fördermenge an die geänderte Gesamtabnahmemenge kann der Betriebspunkt des Radialgebläses wieder zurück in sein Optimum bewegt werden. Dies kommt zum einen der Energieeffizienz der Gesamtluftförderung zugute und führt zum anderen auch zu einer Korrektur des erzeugten Brennluftvordrucks, welcher somit auch bei schwankendem Gesamtbrennluftbedarf, bis auf temporäre, moderate Abweichungen während der Nachregelzeiten, konstant gehalten wird.

Die Fördermengenregelung des Drehkolbengebläses kann dabei kontinuierlich an sich ändernden Abnahmemengen angepasst werden. Eine verzögerungsfreie Anpassung ist, anders als im Einzelgebläsebetrieb, hier nicht erforderlich, da Schwankungen in der Abnahmemenge kurzfristig vom verwendeten Radialgebläse „aufgefangen“ werden.

Radialgebläse eignen sich damit als möglichst konstant betriebene Grundlastgebläse, während sich Drehkolbengebläse für den Einsatz als reine Regelgebläse anbieten. Das Regelgebläse reagiert dabei auf Schwankungen in der Gesamtbrennluftabnahme und sorgt dafür, dass das Grundlastgebläse stets in seinem optimalen Betriebspunkt betrieben werden kann. Zur weiteren Erhöhung der Gesamt-Energieeffizienz bietet es sich außerdem an, mehrere Grundlastgebläse mit einem Regelgebläse zu kombinieren. Die Grundlastgebläse können dabei kaskadenartig zu- oder abgeschaltet werden, sobald das Regelgebläse die Grenze seines Förder-/Regelbereichs erreicht hat. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass dabei der Regelbereich des Regelgebläses immer größer sein sollte als der Nennfördervolumenstroms des größten Grundlastgebläses um ein Optimum an Energieeffizienz zu erreichen. Aus Gründen der Prozesssicherheit bzw. um Ofenabschaltungen durch zu starke Brennluftvordruckschwankungen zu vermeiden, sollte außerdem immer mindestens ein Grundlastgebläse im Einsatz sein.

Außerdem haben die durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass bei der Konfiguration der zentralen Gebläseeinheit die Kennlinienverläufe der verwendeten Radial- bzw. Grundlastgebläse detailliert bewertet und berücksichtigt werden müssen.

Da der Brennluftvordruck, welcher sich, wie oben beschrieben, entsprechend den Schwankungen in der Gesamtbrennluftabnahme ändert, die ausschlaggebende Regelgröße für die Anpassung der Regel- bzw. Drehkolbengebläsedrehzahl ist, sollten

möglichst nur Radialgebläse mit einer über den gesamten relevanten Betriebsbereich stetig fallenden Kennlinie verwendet werden. Weist die Kennlinie eines der verwendeten Radialgebläse ein lokales Maximum auf, so ist über geeignete technische Maßnahmen, wie beispielsweise Sicherheitsabblaseventile, zu gewährleisten, dass dieses Maximum nicht durchlaufen wird, bzw. dass sich ausschließlich Betriebssituationen auf einer Seite des Maximums einstellen können. Andernfalls sind instabile Betriebssituationen nicht auszuschließen und es kann zu negativen Effekten wie Gassäulen- bzw. Druckschwingungen im Verteilnetz und/oder zum Erreichen der Pumpgrenze einzelner Gebläse kommen.

Zur detaillierten und energetisch optimalen Auslegung des Gesamtsystems sind zudem weitere wesentliche Parameter und Abhängigkeiten aller verwendeten Einzelgebläse zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich zum Teil um recht komplexe Zusammenhänge bzw. auch betriebspunktabhängige Parameter wie beispielsweise die individuellen und betriebspunktabhängigen Wirkungsgrade der Einzelgebläse. Aufgrund der Komplexität dieser Abhängigkeiten wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein umfangreiches, Excel-basiertes Auslegungstool entwickelt, welches nun zur Anwendung sowie für weitere Arbeiten und Projekte auf diesem Gebiet zur Verfügung steht.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte gezeigt werden, dass sich die entwickelte Gebläseeinheit, bestehend aus einem Drehkolbengebläse als Regelgebläse sowie einem oder mehreren Radialgebläsen als Grundlastgebläse, besonders für den Einsatz als zentrale Brennluftversorgung für mehrere Industrieöfen eignet. Durch den Zusammenschluss mehrerer Industrieöfen wird deren Gesamtbrennluftbedarf vergleichmäßigt, da die Leistungsspitzen der einzelnen Öfen üblicherweise zeitlich nicht zusammenfallen. Darüber hinaus fallen die relativen Schwankungen im Brennluftbedarf erheblich geringer aus. Beides harmoniert sehr gut mit der Betriebs- und Fördercharakteristik der entwickelten Gebläseeinheit. Durch bedarfsgerechte Zuschaltung einzelner Grundlastgebläse können sowohl das Regelgebläse als auch die Grundlastgebläse im zeitlichen Mittel erheblich näher an ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben werden, wodurch sich weitere energetische Einsparungen realisieren lassen.

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, dass mit einer solchen zentralen Gebläseeinheit, je nach Ofenpark und –betriebsweise, Einsparungen von elektrischem Strom zur Brennluftbereitstellung von 40 – 50 % möglich sind.

Einsparungen im Bereich der Investitionskosten sind hingegen nicht zu erwarten, da die Ofenbetreiber in der Regel die Gesamtförderleistung zur Deckung der zeitgleichen maximalen Brennluftanforderung aller angeschlossenen Öfen wünschen.

Da diese Gesamtförderleistung bei einer zentralen Gebläseeinheit gemeinsam durch mehrere Gebläse gedeckt wird, welche bedarfsgerecht zu- und abgeschaltet werden, ergeben sich weitere betriebliche Vorteile.

Zum einen konnte auf Basis realer Betriebsdaten gezeigt werden, dass bei einem üblichen Produktionsbetrieb in der Regel nicht alle Grundlastgebläse zeitgleich im Einsatz sind. Die sich hieraus ergebende „Teil-Redundanz“ steigert die Ausfallsicherheit der zu versorgenden Öfen erheblich. Fällt ein Gebläse innerhalb der Gebläseeinheit aus, so kann trotzdem die volle Produktionsleistung der Öfen aufrechterhalten werden. Lediglich die zeitgleiche Maximalleistung aller Öfen ist während der Ausfallzeit zu vermeiden. Bei einer dezentralen Brennluftversorgung hingegen wäre die Produktionsleistung eines Ofens während der gesamten Ausfallzeit nicht verfügbar.

Zum anderen können die Wartungskosten durch eine zentrale Brennluftversorgung gegenüber einer dezentralen erheblich reduziert werden. Während bei einer dezentralen Brennluftversorgung jedes Einzelgebläse mit einem eigenen Ansaugluftfilter ausgestattet ist, lässt sich eine zentrale Gebläseeinheit mit einem zentralen, leicht zu erreichenden Ansaugluftfilter ausstatten. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die korrekte Funktionsweise der eingesetzten Luftfiltersysteme einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Energieeffizienz der eingesetzten Gebläse, als auch auf die korrekte Funktionsweise des zu versorgenden Beheizungssystems haben. So führen stark beladene Luftfilter über einen erhöhten inneren Druckverlust zu einer erheblichen Verschlechterung des effektiven Gebläsewirkungsgrades, sowie zu einer deutlichen Leistungsreduzierung und/ oder Verschlechterung von Effizienz und Abgasverhalten der angeschlossenen Brenner. Regelmäßige Filterkontrollen sollten daher hohe Priorität haben. Durch eine zentrale Brennluftversorgung kann der Arbeitsaufwand hierfür erheblich reduziert werden. Wird die zentrale Brennluftversorgung mit einer zentralen Frischluftansaugung ausgestattet, welche bei einer dezentralen Versorgung nicht wirtschaftlich realisierbar

wären, können die Wechselintervalle der Luftfiltereinsätze verlängert und damit noch einmal die Wartungskosten reduziert werden.

Weiterhin können die Schallemissionen einer zentralen Gebläseeinheit wirtschaftlicher beispielsweise durch eine zentrale Einhausung oder Schallschutzhaube reduziert werden, als es bei vielen Einzelgebläsen einer dezentralen Brennluftversorgung möglich wäre. Dies kann als betrieblicher bzw. emissions- und arbeitsschutztechnischer Vorteil gewertet werden.

Eine zentrale Gebläseeinheit für die Brennluftversorgung einer Ofengruppe eignet sich nicht nur für Neubauprojekte. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass auch die dezentralen (Radial-) Brennluftgebläse bestehender Öfen zum Aufbau einer zentralen Gebläseeinheit genutzt werden können. Die existierenden Öfen sollten in räumlicher Nähe zueinander stehen um sie mit einer gemeinsamen Brennluftversorgungsleitung ausstatten zu können. Sind die oben genannten Voraussetzungen erfüllt, können die bestehenden Gebläse innerhalb der zentralen Gebläseeinheit als kaskadenartig und bedarfsgerecht zuschaltbare Grundlastgebläse genutzt werden. Zur vorherigen Überprüfung der Nutzbarkeit kann das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Auslegungstool verwendet werden. Kombiniert werden müssen die in einem solchen Fall damit bereits vorhandenen Grundlastgebläse dann nur noch mit einem zusätzlichen Drehkolbengebläse als Regelgebläse und einem entsprechende Regelsystem. Die Investitionskosten lassen sich somit bei Bestandsanlagen in den meisten Fällen deutlich reduzieren, was die Amortisationszeiten entsprechend verkürzt.

Die Entwicklung des erforderlichen Regelungssystems sowie die abschließende betriebliche Umsetzung und Erprobung war nicht Bestandteil des aktuellen Forschungsvorhabens. Die Projektpartner planen auf Basis der erzielten, positiven Untersuchungsergebnisse ein Anschlussvorhaben mit einer betrieblichen Umsetzung und Erprobung inklusive Einbindung der neuen Technik in die vorhandenen Ofenregelungen und Verifizierung der elektrischen Einsparpotenziale.


#### 4. Danksagung

Das Forschungsvorhaben (DBU-Az: 31898/01-24/0) wurde aus Haushaltsmitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Düsseldorf,  
Ort, Datum

31. 10. 2019

VDEH Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Postfach 10 51 45 40042 Düsseldorf  
Sohnstr. 65 40237 Düsseldorf

  
Unterschrift Geschäftsführung und  
Stempel der Forschungsstelle



**Bericht Nr. 44.078 / U.-Nr. 80.350**

Alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Ohne ausdrückliche Genehmigung des BfI ist es auch nicht gestattet, diesen Bericht  
oder Teile daraus auf photomechanischem oder anderem Wege zu vervielfältigen.



**VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
GmbH**

Sohnstr. 65  
40237 Düsseldorf

Fon +49 (0) 211 67 07-0  
Fax +49 (0) 211 67 07-310

Mail [info@bfi.de](mailto:info@bfi.de)  
Web [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

