

Einfluss der Auslegung und Abstufung der Gebläse auf die Effizienz der Belüftungseinrichtung

G. Seibert-Erling

1. Einleitung

Vor etwa 10 Jahren konnte man überschlägig davon ausgehen, dass die jährlichen Energiekosten für ein Drehkolbengebläse im Dauerbetrieb etwa so hoch sind wie die einmaligen Anschaffungskosten. Bei einer realistisch angenommenen Lebensdauer von rd. 40.000 Bh setzen sich dann die Lebenszykluskosten vereinfacht aus 15 % Investitions- und 85 % Energiekosten zusammen. Nachdem sich die Stromkosten (in Deutschland) verdoppelt haben, liegt der Anteil der Energiekosten mittlerweile bei über 90 %.

Die Auslegung von Gebläsen und Belüftungseinrichtungen für Kläranlagen erfolgt vorrangig nach den gültigen Bemessungsregeln (DWA-A 131). Hinzu kommen die üblichen hohen Anforderungen an die Betriebssicherheit und der Wunsch nach einer möglichst einfachen Instandhaltung. Am Ende einer solchen Planung stehen dann die bekannten (schlechten) Lösungen mit gleich großen Gebläsen nach dem n+1-Prinzip, die sich durch eine sehr große Gesamtluftmenge, zu knappe Übergänge an den Schaltpunkten und eine fehlende Abdeckung kleiner Luftmengen bei schwacher Belastung auszeichnen. Obwohl das Problem der „großzügigen“ Dimensionierung in der Fachwelt seit Jahren hinlänglich bekannt ist, werden bei fälligen Modernisierungen mit dem Verweis auf die genehmigungsrechtliche Situation nicht selten die Gebläse durch modernere Aggregate, jedoch in der gleichen Anzahl, Größe und Abstufung ersetzt. Zur Behebung der bekannten betrieblichen Nachteile wird gerne eine möglichst komplexe Regelung implementiert. Im ungünstigsten Fall wird dann eine Menge Geld in neue energieeffiziente Aggregate investiert; die alten Probleme sind am Ende trotzdem nicht behoben. Vor allem tritt die erwartete Energieeinsparung nicht ein, weil die Aggregate nach wie vor in einem ungünstigen Bereich des energetischen Kennfeldes laufen.

2. Auswahl von Druckluftherzeugungsaggregaten

Druckluftherzeugungsaggregate lassen sich nach dem thermodynamischen Arbeitsprinzip einteilen in Verdrängermaschinen und Strömungsmaschinen. Für die bei der Abwasserreinigung eingesetzten Aggregate (Bild 1) ergibt sich folgende Situation:

- Bei Verdrängermaschinen ohne innere Verdichtung (Drehkolbengebläse) wird der Druck erst in dem am Druckstutzen angeschlossenen System aufgebaut, während bei Aggregaten mit innerer Verdichtung (Schraubenverdichter) die Luft am Ausgangsstutzen schon mit dem vorgesehenen Druck bereitgestellt wird.
- Strömungsmaschinen (Turboverdichter) konventioneller Bauart werden mit fester Drehzahl betrieben. Die Verstellung der Luftmenge erfolgt durch einen Diffusor (Nachleitapparat). Mit einem verstellbaren Vorleitgitter kann der Drall auf das Laufrad in Abhängigkeit von Ansaugdruck und -temperatur angepasst werden, was eine Energieeinsparung bis zu 25 % bringt. Seit Mitte der 90er Jahre sind schnelllaufende drehzahlverstellbare Aggregate in Kompaktbauweise am Markt verfügbar, die sich vor allem durch eine verschleißfreie Lagerung (Magnetlagerung, Luftlagerung) auszeichnen.



Bild 1: Übersicht von Gebläsen und Verdichtern am Markt (2015)

Das vielfältigere Angebot macht die Auswahl und Beschaffung neuer Aggregate allerdings nicht einfacher. Zwar kann anhand der Luftmenge und des erforderlichen Druckes für die aktuelle Marktsituation eine grobe Vorauswahl für Einzelaggregate getroffen werden (Bild 2). Auf die energetischen Kennwerte und das Betriebsverhalten der unterschiedlichen Aggregate wird später noch detailliert eingegangen.

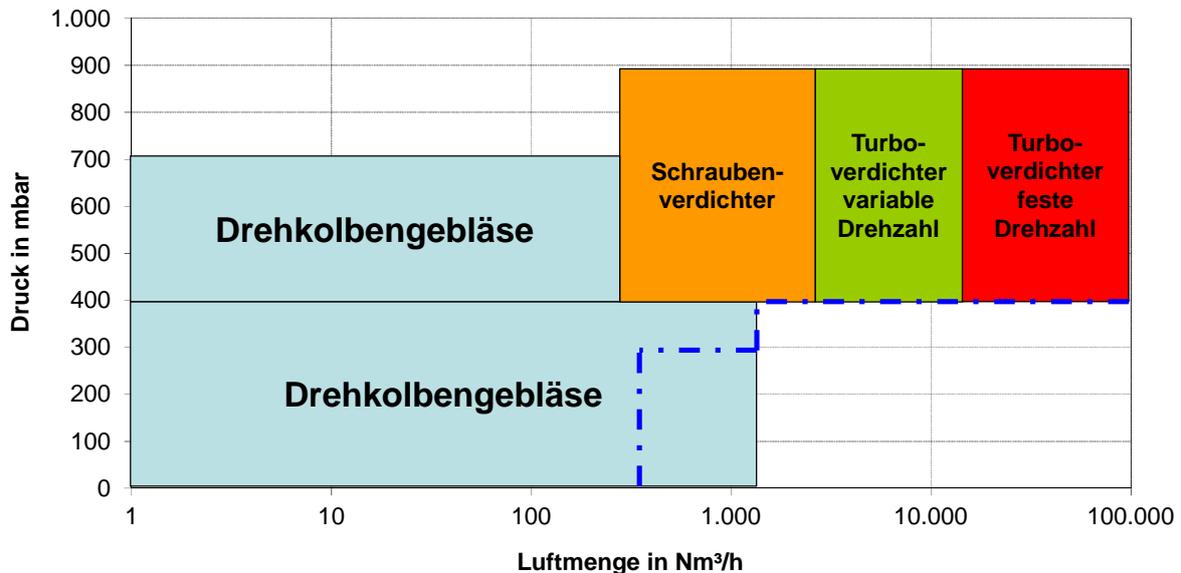


Bild 2: Einsatzbereiche für Gebläse und Verdichter unterschiedlicher Bauarten

Wenn die Energiekosten weiter in den Vordergrund rücken, dann ist insgesamt ein Paradigmenwechsel angesagt. Dann müssen nicht nur die bisherigen Kriterien für die Verfügbarkeit und die Instandhaltung auf den Prüfstand, sondern es ist auch die Einhaltung der genehmigungsrechtlichen Werte für die Luftmenge zu diskutieren. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Die Vorgaben aus der bestehenden Genehmigungsplanung werden in der Summe erfüllt; es ändert sich lediglich die Staffelung der Aggregate. In diesem Falle ist die Änderung als unwesentlich einzustufen.
- Von den Vorgaben aus der Genehmigung wird nach unten abgewichen. Dann muss schon eine entsprechende Begründung geliefert werden. An dieser Stelle sind nicht nur die Kompetenz und Erfahrung des Planers gefragt, sondern der Betreiber muss diese Entscheidung auch mittragen und gegenüber der Aufsichtsbehörde verantworten.

Eine geringere Gesamtluftmenge lässt sich durchaus mit einer Analyse von Betriebsdaten aus den zurückliegenden Jahren begründen. Eine absehbar geringere Einwohnerbelastung unterhalb der Ausbaugröße ist ebenfalls ein Argument. Darüber hinaus können Platzreserven oder Aufrüstungsmöglichkeiten mit der Behörde abgestimmt werden. Allerdings sollten die genannten Möglichkeiten möglichst flexibel gehalten werden. Es ist vor allem nicht mehr erforderlich, den Luftbedarf rechnerisch exakt zu bestimmen und dann die Gebläse punktgenau darauf auszulegen. Viel wichtiger ist dagegen die Ermittlung des Luftbedarfs für auftretende geringe Belastungen bezogen auf den Istzustand. Erfahrungsgemäß bereitet gerade dieser Betriebszustand immer wieder verfahrenstechnische Probleme (Denitrifikation) und kann bei falscher Gebläsauslegung nur energetisch uneffizient abgedeckt werden.

Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise hat sich bei der Modernisierung von Kläranlagen bewährt. Damit werden die Forderungen nach hoher Verfügbarkeit, ruhigem Betriebsverhalten (Überdeckung) und flexibler Ausbaureserve erfüllt. Zugleich werden die Grundsteine für einen energieeffizienten Betrieb und gute Regelungseigenschaften gelegt.

- Der Belastungszustand (Luftmenge) wird anhand der Betriebsdaten aus den zurückliegenden Jahren analysiert unter der Voraussetzung, dass die erzielte Reinigungsleistung und der Energieverbrauch in einem üblichen Rahmen liegen.
- Es ist dann zu prüfen, ob sich die ermittelten Auslegungsdaten durch weitere Optimierungen (Austausch von Belüftern, Veränderung von Sollwerten, neue Gebläse/Verdichter, geänderte Belastung, etc.) verschieben.
- Die Dimensionierung erfolgt dann so, dass die mit der größten Häufigkeit auftretenden Belastungswerte mit einem einzigen möglichst energieeffizienten Aggregat abgedeckt werden („Rennpferd“).
- Für die seltener auftretenden Betriebszustände wird die Aggregategruppe so ergänzt, dass alle sonstigen Forderungen erfüllt werden. Jedoch nicht zwingend mit (teuren) effizienten Aggregaten, sondern mit einer Kombination, welche den Forderungen nach Verfügbarkeit, ausreichender Überdeckung an den Umschaltpunkten und robustem Betrieb gerecht wird („Arbeitspferde“).

Das kann durchaus dazu führen, dass Aggregate unterschiedlicher Baugrößen, Typen und sogar von unterschiedlichen Herstellern kombiniert werden. Die sich daraus ergebenden zusätzlichen Anforderungen an die Regelung, die Bedienung und den Betrieb von Nebenaggregaten muss man akzeptieren. Die Umsetzung der veränderten Anforderungen sollte bei der Verwendung neuer elektrotechnischer Bauteile und bei einer strukturierten Programmierung kein Problem sein. Außerdem ist absehbar, dass sich diese „Baustelle“ mittelfristig aufgrund der erkennbaren technischen Entwicklung auflöst. Der Trend bei Druckluftherzeugungsaggregaten geht zu Kompaktgeräten mit integrierter elektrotechnischer Ausrüstung (Schaltgeräte, Frequenzumrichter, Modulsteuerung, etc.). Dieser Trend zur Mechatronik ist bei Schieberantrieben, Pumpen, BHKWs und anderen typischen maschinentechnischen Ausrüstungsteilen von Kläranlagen ebenfalls zu beobachten. Bei den neuartigen schnelllaufenden Turboverdichtern ist diese technische Integration zwingend, weil ein solches Aggregat ohne zugehörige komplexe Steuerung und Regelung nicht betriebsfähig wäre. Eine früher übliche getrennte Aufstellung von Maschine und Steuerung aufgrund der Wärme- und Geräuschentwicklung ist heute beherrschbar; gleichwohl gibt es hier zwischen den einzelnen Fabrikaten noch markante Unterschiede.

3. Kennwerte für die energetische Effizienz

Energetische Kennwerte von Druckluftherzeugungsaggregaten sind in technischen Regelwerken festgelegt, nach denen Abnahmen und Leistungsversuche durchgeführt werden. Unterschieden wird zwischen der Bestimmung des Leistungsbedarfs durch thermodynamische Bilanzierung (DIN 1945, ISO 5389) und der Bestimmung der mechanischen Leistungsaufnahme unter definierten Betriebsbedingungen bei geforderten Werten für Luftmenge und Druck (ISO 1217).

Die Hersteller verfügen in ihren Werken über entsprechend zertifizierte Prüfstände mit geeichten Messgeräten (Bild 3). Weil die Vorhaltung und der Betrieb der Prüfstände sehr kostenaufwändig sind, werden bei der Werksprüfung nicht unbedingt die vorgegebenen Betriebszustände eingestellt, sondern die Prüfbedingungen werden so eingestellt, dass die Messwerte in einem geeichten Bereich liegen. Die gemessenen Werte werden dann auf die geforderten Prüfbedingungen umgerechnet. Diese Prüfmethoden sind üblich und zulässig, sie entsprechen der angegebenen Normung.

Der Aufbau eines Prüfstandes unterscheidet sich signifikant von den Einsatzbedingungen eines Aggregates auf einer Kläranlage (Bild 4). Abgesehen von der Anordnung der Messgeräte und den Ansprüchen an die Genauigkeit der Messwerte ist schon die saug- und druckseitige Einbindung nicht vergleichbar. Vor allem aber ist es unter laufenden Betriebsbedingungen nur sehr schwierig oder gar nicht möglich, vorgegebene konstante Betriebsbedingungen (Druck, Luftmenge) einzustellen.

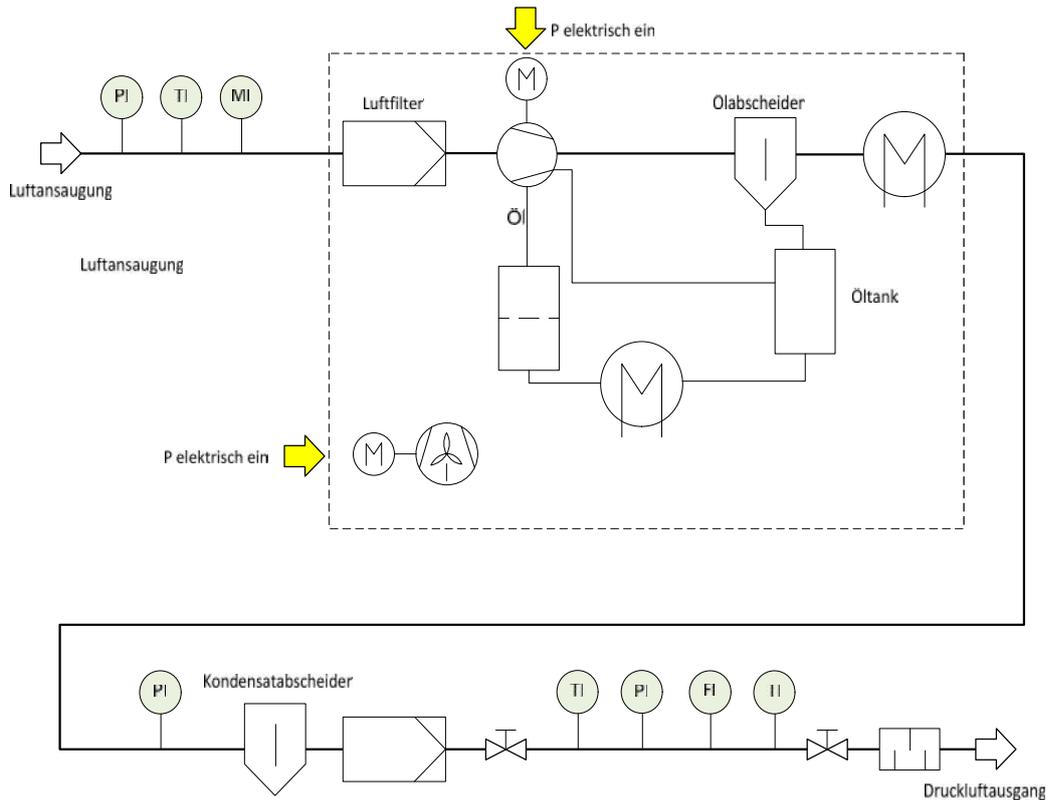


Bild 3: Fließbild eines Prüfstandes für Abnahmen nach ISO 1217

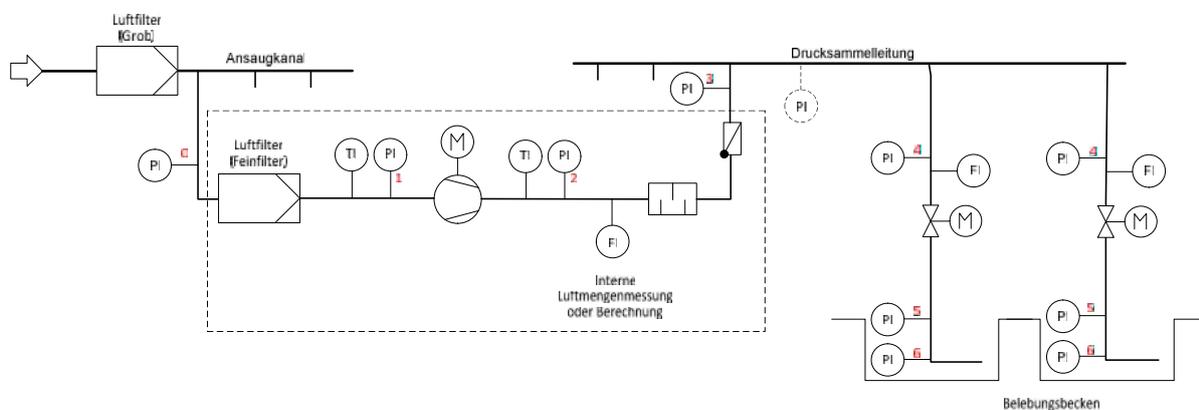


Bild 4: Fließbild eines Druckluftherzeugungsaggregates unter Betriebsbedingungen

Die Verwendung energetischer Kennwerte von Druckluftherzeugungsaggregaten für die Auslegung kompletter Stationen oder für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung erfordert daher entsprechende Fachkenntnisse. Vergleichende Betrachtungen für Aggregate unterschiedlicher Hersteller sind bei der Verwendung einheitlicher Prüfverfahren zulässig. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass die Prüfbedingungen (Ansaugtemperatur, Enddruck, etc.) und die Systemgrenzen (mit/ohne Rückschlagklappe, etc.) gleich sind.

Eine Reproduktion der Prüfergebnisse einer Werksabnahme nach der Inbetriebnahme eines Aggregates im laufenden Betrieb bleibt nach derzeitigem Kenntnisstand trotz vielfältiger Bemühungen noch Wunschdenken. An Lösungen oder Anordnungen, die für Hersteller und Betreiber zu akzeptablen Werten und Ergebnissen führen, wird gleichwohl an mehreren Stellen gearbeitet.

Aus betrieblicher Sicht ist ein Vergleich mit den Ergebnissen einer Werksabnahme zunächst nur von akademischem Interesse. Maßgebend ist das Verhalten an der realen Anlage. Von großem Interesse ist hingegen das Verhalten unterschiedlicher Aggregate unter gleichen Betriebsbedingungen. Hier interessiert zudem weniger die absolute Genauigkeit sondern der relative Unterschied. Das gilt vor allem für die energetische Effizienz. Sofern die für eine energetische Bewertung bestimmenden Größen Leistungsaufnahme, Druck in der Sammelleitung und die Luftmenge erfasst werden, können die vorhandenen Aggregate einzeln nacheinander unter sonst gleichen Bedingungen (Sauerstoffregelung auf Handbetrieb stellen, Schieber öffnen, etc.) überprüft werden. Als möglichst einfach zu ermittelnder betrieblicher Kennwert hat sich die spezifische Leistungsaufnahme bewährt:

$$P_{\text{spez}} = P_{\text{el}} / (Q \cdot p)$$

mit:

P_{spez} - spezifischer Leistungsbedarf in W/(Nm³/h bar)

P_{el} - elektrische Wirkleistungsaufnahme des Aggregates (NS-Abgang)

Q - Luftmenge, vorzugsweise gemessen auf der Druckseite in Nm³/h

p - Druck in der Drucksammelleitung

Zu kritisieren ist an dieser Formel, dass keine SI-Einheiten verwendet werden, dass eine Division durch den Druck wegen der bekannten Nichtlinearität eigentlich unzulässig ist und dass sie eigentlich nichts anderes als den reziproken Wert des Wirkungsgrades darstellt. Dennoch hat die neue Definition durchaus ihre Berechtigung, weil sie in der Praxis einfach handhabbar ist vor allem den relativen Vergleich unterschiedlicher Aggregate am Einsatzort ermöglicht.

Im Vergleich zu einer Werksabnahme sind das Antriebsaggregat einschließlich eines Frequenzumrichters zur Drehzahlverstellung und eine Rückschlagklappe vor der Sammelleitung in der Betrachtung enthalten. Im Handbetrieb kann durch Vorgabe der Leistung oder Luftmenge dann die Kennlinie punktweise aufgenommen werden (Bild 5).

Und weil die beschriebenen Probleme mit der Vergleichbarkeit von Energiekennwerten nicht nur auf Kläranlagen auftreten, sondern generell bei der Druckluftherzeugung, wird von der Herstellern neuerdings das „Wire to Air“-Prinzip propagiert, welches letztendlich keinen anderen als den beschriebenen Zusammenhang widerspiegelt.

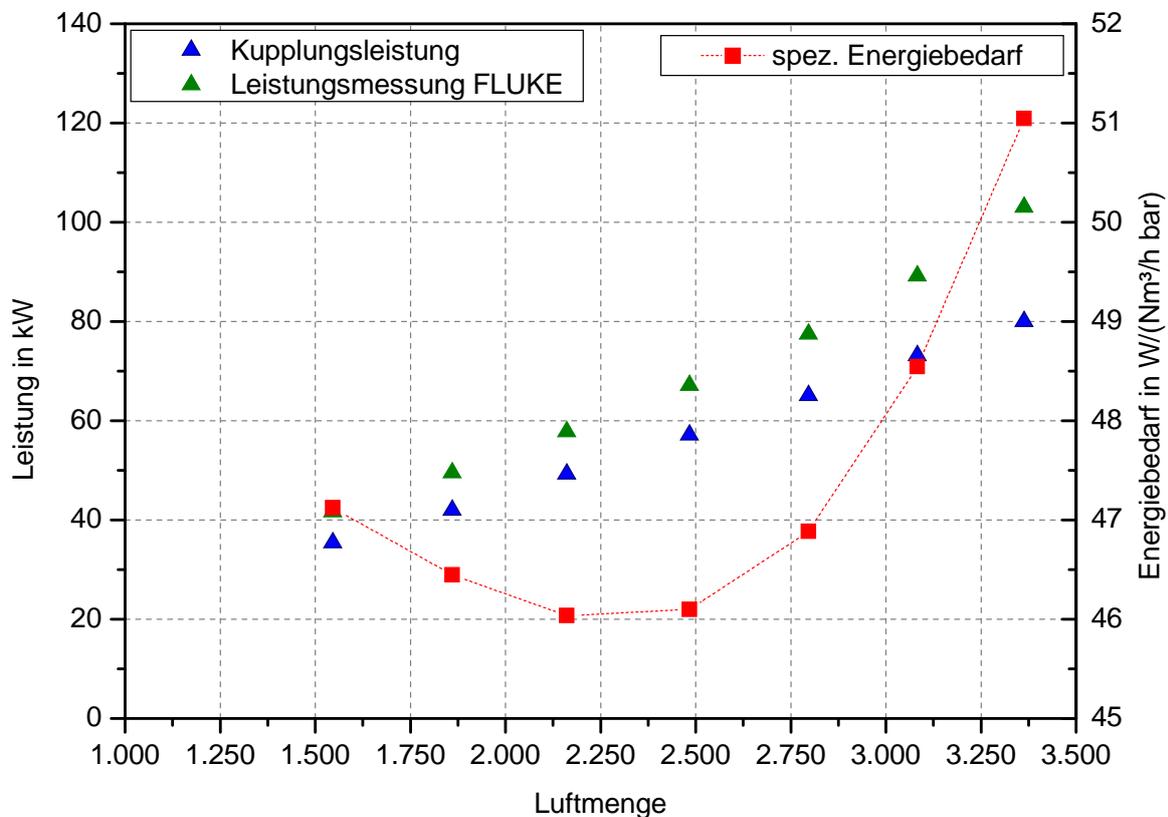


Bild 5: Kennlinie (spezifischer Leistungsbedarf) eines Drehkolbengebläses

4. (Ungünstige) Staffelung von Aggregaten

Die zuvor dargestellte Kennlinie basiert auf Leistungsmessungen im Rahmen einer Energieanalyse. Zur Überprüfung der Gebläseauslegung wurden weiterhin die Messwerte der Luftmengen über ein volles Betriebsjahr analysiert. Die sich ergebende Häufigkeitsverteilung ist im Bild 6 dargestellt. Der Betriebspunkt mit der größten Häufigkeit liegt bei ca. 3.000 Nm³/h. Die Kennlinie des eingesetzten und überprüften Gebläses erreicht jedoch gerade hier nur eine schlechte Effizienz. Durch die Wahl fünf gleich großer Gebläse liegt außerdem der Umschaltzeitpunkt genau in dem am häufigsten auftretenden Betriebspunkt (unteres Bild), was zu einer großen Schalalthäufigkeit führt.

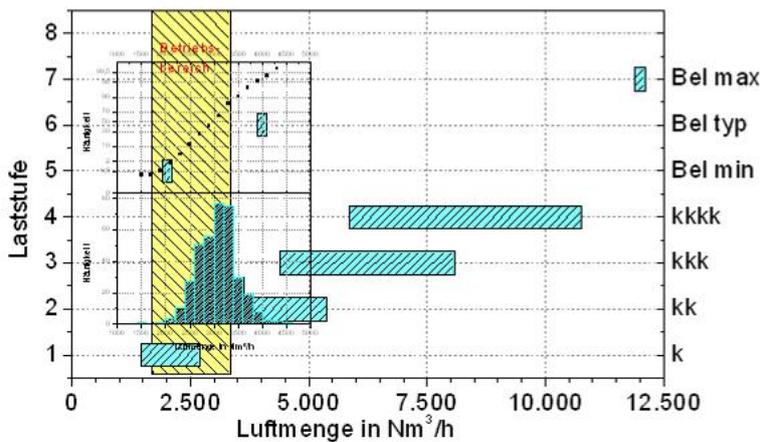
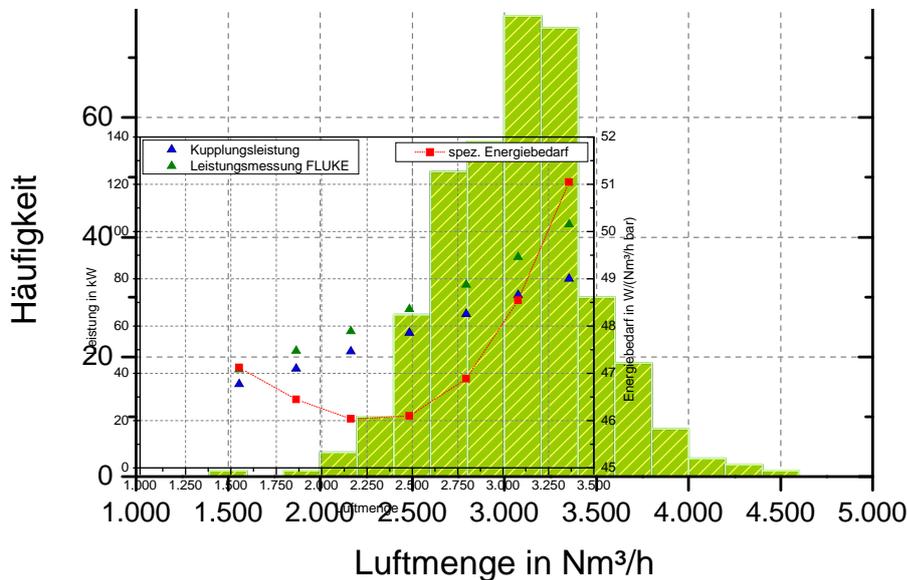


Bild 6: Häufigkeitsverteilung energetische Kennlinie und Staffelung

5. Praxisbeispiel Großklärwerk Köln-Stammheim

Das Großklärwerk Köln-Stammheim hat eine Ausbaugröße von 1,57 Mio. EW. Die Druckluftversorgung der einzelnen Verfahrensstufen (AB-Verfahren mit Hochlast- und Schwachlastbelebungen) erfolgt mit mehreren Verdichterstationen. Die größte Station VG02 dient zur Versorgung der Becken 7-14 der Schwachlastbelebungen. Die erzeugte Luftmenge beträgt insgesamt ca. 100.000 Nm³/h.

Ausgelöst durch einen nicht vorhersehbaren Ausfall in 2012 war eine zügige Ersatzbeschaffung erforderlich. Allerdings sollte geprüft werden, ob ein 1:1-Ersatz erfolgen sollte oder ob in diesem Zuge eine Modernisierung der gesamten Station sinnvoller war. Aufgrund einer Analyse der Betriebsdaten ergab sich, dass die bisherige Staffe- lung mit vier baugleichen Turboverdichtern ungünstig war (Bild 7). Einerseits waren ständig bis zu drei Maschinen in Betrieb und andererseits kam es aufgrund der bei gleich großen Aggregaten geringen Überdeckung an den Umschaltpunkten zu häufi- gen Schaltungen mit ungünstigen Auswirkungen auf das Regelverhalten der insge- samt 40 Regelstrecken der Luftverteilung der Belebungsbecken.

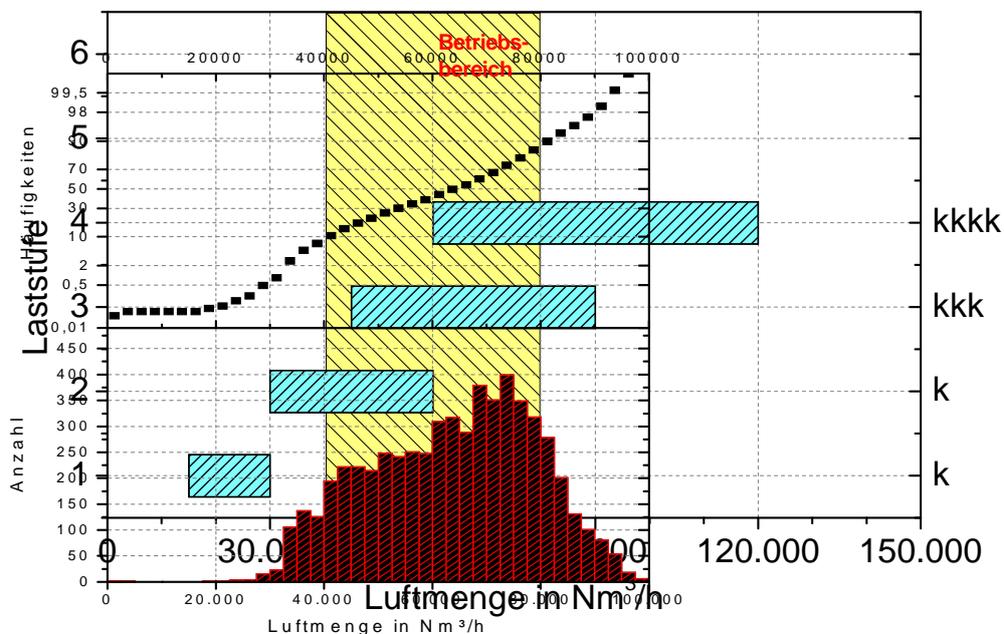


Bild 7: Luftmengen und Staffe- lung vor dem Umbau

Es wurde entschieden, zwei Aggregate durch gleichartige, jedoch mit der nächsthöheren Baugröße zu ersetzen (Bild 8). Dadurch werden mehrere erkannte Probleme in einem Zug behoben:

- Die Staffelung der Aggregate wird deutlich verbessert. Zwar waren unmittelbar nach der getroffenen Entscheidung die Auslegungsdaten noch nicht exakt bekannt. Die Erwartung, dass zukünftig mit der Kombination 1 großer + 1 kleiner bzw. 2 große Verdichter in ca. 80% der Zeit der Bedarf gedeckt wird, hat sich weitgehend bestätigt (Bild 9, oben)
- Die Schalthäufigkeit hat sich drastisch verringert. Der hohe Überdeckungsgrad erlaubt es im Normalbetrieb sogar, Stufen auszublenden, bei denen mehr als 1 Verdichter geschaltet werden muss. Wegen der bei dieser Leistungsklasse (950 kW) auftretenden An- und Abfahrvorgänge wirkt sich das wiederum günstig auf das Regelverhalten der gesamten Belebung aus (Bild 9, unten)
- Die Druckregelung wurde neu konzipiert und nach weitgehend problemloser Inbetriebnahme optimiert. Die Regelabweichung, die mit der alten Regelung im Bereich von +/- 20 mbar lag, hat sich auf weniger als 3 mbar reduziert. Das ruhige Verhalten der Regelung hat eine unmittelbare Auswirkung auf den Energieverbrauch, weil sich dadurch die interne Vorleitgitterregelung des Verdichters überhaupt erst stabilisieren kann. Bei den „kleinen“ Turboverdichtern mit einer Leistung von 650 kW führt eine nicht funktionierende VLG-Regelung nachweislich zu einer um 170 kW höheren Leistungsaufnahme.



Bild 8: Neuer Turboverdichter (42.000 Nm³/h, 630 mbar, 950 kW), noch ohne Schallhaube

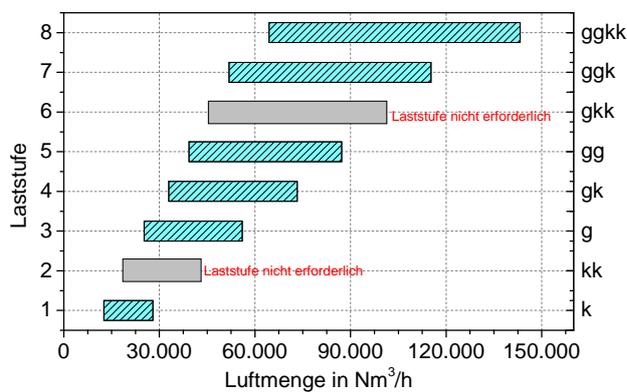
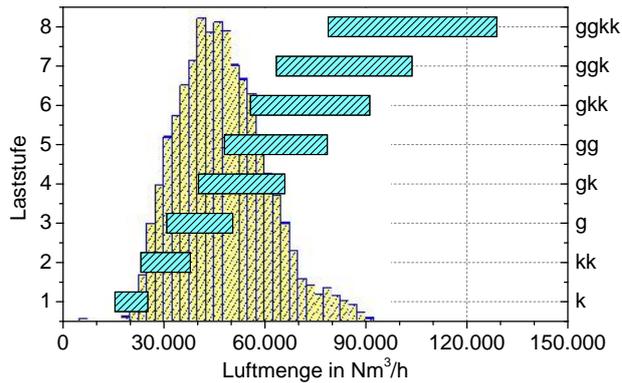


Bild 9: Staffelung nach dem Umbau, Ausblenden einzelner Laststufen

6. Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Auswahl von Druckluftherzeugungsaggregaten ist die energetische Effizienz aufgrund der drastisch gestiegenen Strompreise heute das wesentliche Auslegungskriterium. Die Forderungen nach Betriebssicherheit und Verfügbarkeit einer gesamten Gebläsestation lassen sich durch die Kombination unterschiedlicher Aggregate mit einer auf die Lastfälle abgestimmten Staffelung erfüllen. Für die Auslegung einer Station oder Aggregategruppe sollte die Belastung im Istzustand ausschlaggebend sein, um die in der Vergangenheit oft aufgetretene Überdimensionierung zu vermeiden. Stattdessen sollte der Ausbau durch Vorhaltung von Platz- oder Leistungsreserven flexibilisiert werden. Vorrangiges Ziel muss dabei die Abdeckung des Betriebsbereiches mit der größten auftretenden Häufigkeit durch ein in diesem Bereich möglichst energieeffizientes Druckluftherzeugungsaggregat sein.