

TEXTE

05/2019

# Vollzugshinweise zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren Anhang zum Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Aktualisierung der Daten des BVT- Merkblattes Energy Efficiency“



TEXTE 05/2019

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für  
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 53 3123

UBA-FB 00/2019

# **Vollzugshinweise zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren**

Anhang zum Abschlussbericht des Forschungsvorhabens  
„Aktualisierung des BVT-Merkblattes Energy Efficiency“

von

Dr. Hagen Hilse

Doris Grahn

Falk Rebbe

Dirk Richter

Dr. Annett Schröter

Falk Wittmann

Stefan Zorn

GICON Grossmann Ingenieur Consult GmbH

Prof. Dr.-Ing. habil Tobias Zschunke

Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert

Ralf Pohl

Hochschule Zittau/Görlitz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[info@umweltbundesamt.de](mailto:info@umweltbundesamt.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

### Durchführung der Studie:

GICON Großmann Ingenieur Consult GmbH  
Tiergartenstraße 48  
01219 Dresden

### Abschlussdatum:

Mai 2019

### Redaktion:

Fachgebiet V 1.4 Energieeffizienz  
Fachbegleitung: Reinhard Albert

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

### **Kurzbeschreibung: Aktualisierung des BVT-Merkblattes Energy Efficiency**

Für eine schnellere und zielgerichtete Anwendbarkeit der Informationen dieses BVT-Merkblattes insbesondere bei der praktischen Durchführung von Genehmigungsverfahren wurde im Rahmen des Projektes zu dessen Aktualisierung in den Jahren 2016 – 2019 zusätzlich ein Dokument „Beitrag für eine Vollzugshilfe zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren“ erarbeitet. Der Beitrag steht im Zusammenhang mit der konkreteren Ausformung des Energieeffizienzgebotes gemäß § 5 des Bundesimmissionsschutzgesetzes und der diesbezüglichen Konkretisierung bei der im Jahr 2019 geplanten Novelle der TA Luft.

Inhaltlicher Kern dieses Dokumentes sind Auszüge aus dem Kapitel 3 des BVT-Merkblattes in verdichteter Form. Für alle von der Überarbeitung umfassten Kapitel zu einzelnen Querschnittstechnologien wurde ein gesondertes Kapitel als Beitrag für eine Vollzugshilfe entwickelt. Die Gliederung der jeweiligen Kapitel orientiert sich methodisch an einem themenbezogenen Prüfvorgang in Genehmigungsverfahren.

Dieser Beitrag für kann als Anhang zum Forschungsbericht „Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes „Energy Efficiency“ betrachtet werden.

Wegen einer möglichen späteren Nutzung als Einzeldokument wurde dieser Anhang redaktionstechnisch als gesondertes Dokument erstellt.

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildungsverzeichnis .....                                                                                                                                               | 11 |
| Tabellenverzeichnis .....                                                                                                                                                 | 12 |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                                                                                                                               | 13 |
| A. Beitrag für eine Vollzugshilfe zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren ..... | 18 |
| A.1 Feuerungsanlagen .....                                                                                                                                                | 18 |
| A.1.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Feuerungsanlagen .....                                                                            | 18 |
| A.1.1.1 Definition von Feuerungsanlagen und Abgrenzung zu anderen BVT-Merkblättern und umweltschutzbezogenen Vorschriften .....                                           | 18 |
| A.1.2 Allgemeine Energiebilanz und Effizienz einer Feuerungsanlage .....                                                                                                  | 22 |
| A.1.3 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen .....                                                                                            | 24 |
| A.1.3.1 Reduzierung der Abgastemperatur .....                                                                                                                             | 24 |
| A.1.3.2 Energetische Optimierung von Brennern .....                                                                                                                       | 26 |
| A.1.3.3 Optimierung des Luftüberschusses .....                                                                                                                            | 27 |
| A.1.3.4 Wahl des Brennstoffes .....                                                                                                                                       | 29 |
| A.1.3.5 Reduzierung der Wärmeverluste .....                                                                                                                               | 29 |
| A.1.4 Angaben zur Energieeffizienz von Feuerungsanlagen im Rahmen eines Antragsverfahrens .....                                                                           | 30 |
| A.2 Dampfsysteme .....                                                                                                                                                    | 32 |
| A.2.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Dampfsysteme .....                                                                                | 32 |
| A.2.1.1 Anwendungsbereich von Dampfsystemen und einsatzbestimmende Eigenschaften .....                                                                                    | 32 |
| A.2.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Dampfsystemen im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes .....                                       | 34 |
| A.2.2 Angaben zum Dampfsystem im Rahmen eines Antragsverfahrens .....                                                                                                     | 35 |
| A.2.2.1 Wesentliche Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz .....                                                                                       | 37 |
| A.2.2.2 Dampfverbraucher .....                                                                                                                                            | 37 |
| A.2.2.3 Dampfverteilung .....                                                                                                                                             | 37 |
| A.2.2.4 Rückgewinnung .....                                                                                                                                               | 40 |
| A.2.2.5 Dampferzeugung .....                                                                                                                                              | 42 |
| A.3 Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme .....                                                                                                                        | 48 |
| A.3.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme .....                                                    | 48 |

|         |                                                                                                                                             |    |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.3.1.1 | Definition von Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlssystemen und Abgrenzung zu anderen Querschnittstechnologien .....                          | 48 |
| A.3.1.2 | Bagatellschwellenprüfung .....                                                                                                              | 49 |
| A.3.1.3 | Systembetrachtung zur Abwärmenutzung .....                                                                                                  | 50 |
| A.3.2   | Stand der Technik bezüglich der Technologien zur Wärmerückgewinnung und Rückkühlung.....                                                    | 50 |
| A.3.2.1 | Wärmeübertrager .....                                                                                                                       | 50 |
| A.3.2.2 | Wärmespeicher .....                                                                                                                         | 51 |
| A.3.2.3 | Wärmepumpen .....                                                                                                                           | 53 |
| A.3.2.4 | Absorptions- und Adsorptions-Kältemaschinen .....                                                                                           | 55 |
| A.3.2.5 | Rückkühlssysteme .....                                                                                                                      | 56 |
| A.3.3   | Angaben zu Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlssystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens.....                                                | 56 |
| A.4     | Elektromotorische Antriebe .....                                                                                                            | 58 |
| A.4.1   | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Elektromotorische Antriebe .....                                          | 58 |
| A.4.1.1 | Anwendungsbereich elektromotorischer Antriebe und einsatzbestimmende Eigenschaften.....                                                     | 58 |
| A.4.1.2 | Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes elektrischer Antriebe und Motoren im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes ..... | 66 |
| A.4.2   | Angaben zu elektrische Antrieben und Motoren im Rahmen eines Antragsverfahrens ..                                                           | 67 |
| A.4.2.1 | Energieeffiziente Elektromotoren .....                                                                                                      | 67 |
| A.4.2.2 | Auslegung und Bemessung von Motoren .....                                                                                                   | 69 |
| A.4.2.3 | Antriebe mit variabler Drehzahl .....                                                                                                       | 70 |
| A.4.2.4 | Rückspeisung von Bremsenergie .....                                                                                                         | 71 |
| A.4.2.5 | Verluste bei der mechanischen Kraftübertragung.....                                                                                         | 71 |
| A.4.2.6 | Reparatur und Neuwicklung von Elektromotoren.....                                                                                           | 72 |
| A.4.2.7 | Betrieb von Elektromotoren .....                                                                                                            | 72 |
| A.4.2.8 | Zusammenfassung .....                                                                                                                       | 73 |
| A.5     | Druckluftsysteme <Compressed air systems> (CAS) .....                                                                                       | 74 |
| A.5.1   | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Druckluft .....                                                           | 74 |
| A.5.1.1 | Anwendungsbereich von Druckluft und einsatzbestimmende Eigenschaften .....                                                                  | 74 |
| A.5.1.2 | Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Druckluft im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes.....                      | 75 |
| A.5.2   | Angaben zum Druckluftsystem im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung Bagatellschwellen) .....                                  | 77 |
| A.5.2.1 | Betrachtung der Druckluftverbraucher .....                                                                                                  | 77 |

|         |                                                                                                                                |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.5.2.2 | Betrachtung des Druckluft-Verteilsystems .....                                                                                 | 78  |
| A.5.2.3 | Druckluftspeicher .....                                                                                                        | 79  |
| A.5.2.4 | Drucklufterzeugung .....                                                                                                       | 79  |
| A.5.2.5 | Betrieb von Druckluftanlagen .....                                                                                             | 84  |
| A.5.3   | Anlagen .....                                                                                                                  | 86  |
| A.5.3.1 | Beispiel für eine Auflistung von Druckluftverbrauchern als Grundlage der<br>Systemauslegung .....                              | 86  |
| A.6     | Pumpensysteme.....                                                                                                             | 87  |
| A.6.1   | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich<br>Pumpensysteme.....                                        | 87  |
| A.6.1.1 | Anwendungsbereich von Pumpensystemen und einsatzbestimmende Eigenschaften                                                      | 87  |
| A.6.1.2 | Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Pumpensystemen im Kontext<br>des zu prüfenden Antragsgegenstandes..... | 87  |
| A.6.2   | Angaben zu Pumpensystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens .....                                                              | 88  |
| A.6.2.1 | Förderaufgabe.....                                                                                                             | 89  |
| A.6.2.2 | Rohrleitungssystem .....                                                                                                       | 89  |
| A.6.2.3 | Pumpe .....                                                                                                                    | 91  |
| A.6.2.4 | Motor und Getriebe .....                                                                                                       | 95  |
| A.6.2.5 | Steuerung und Regelung.....                                                                                                    | 96  |
| A.6.2.6 | Wartung und Instandhaltung.....                                                                                                | 98  |
| A.6.2.7 | Lebenszykluskosten von Pumpensystemen.....                                                                                     | 99  |
| A.7     | Industrielle Lufttechnik .....                                                                                                 | 101 |
| A.7.1   | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Industrielle<br>Lufttechnik .....                            | 101 |
| A.7.1.1 | Anwendungsbereich und einsatzbestimmende Eigenschaften.....                                                                    | 101 |
| A.7.1.2 | Qualitative und quantitative Relevanz von lufttechnischen Anlagen im Kontext des zu<br>prüfenden Antragsgegenstandes.....      | 101 |
| A.7.2   | Angaben zu lufttechnischen Anlagen im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei<br>Überschreitung Bagatellschwellen) .....           | 103 |
| A.7.2.1 | Dimensionierung des lufttechnischen Verteilsystems.....                                                                        | 103 |
| A.7.2.2 | Dichtheit des Lufttechnischen Systems .....                                                                                    | 104 |
| A.7.2.3 | Einbauten zur Gefahrstoffentfernung aus dem Luftstrom und zur Konditionierung der<br>Luft .....                                | 104 |
| A.7.2.4 | Auswahl des Ventilators .....                                                                                                  | 105 |
| A.7.2.5 | Motor und Getriebe .....                                                                                                       | 106 |
| A.7.2.6 | Steuerung und Regelung lufttechnischer Anlagen .....                                                                           | 106 |



|          |                                                                                                                                      |     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.7.2.7  | Wartung, Instandhaltung, Monitoring.....                                                                                             | 106 |
| A.8      | Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage <Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems .....                                 | 107 |
| A.8.1    | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Heizungs- Lüftungs- und Klimaanlage .....                          | 107 |
| A.8.1.1  | Anwendungsbereich von Heizungs- Lüftungs- und Klimaanlage und einsatzbestimmende Eigenschaften .....                                 | 107 |
| A.8.1.2  | Qualitative und quantitative Relevanz von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes ..... | 107 |
| A.8.2    | Angaben zu Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung Bagatellschwellen) .....       | 109 |
| A.8.2.1  | Heizsysteme .....                                                                                                                    | 109 |
| A.8.2.2  | Kühlung .....                                                                                                                        | 111 |
| A.8.2.3  | Lüftung und Klimatisierung (Raumluftechnische Anlagen) .....                                                                         | 112 |
| A.8.2.4  | Regelung .....                                                                                                                       | 115 |
| A.8.2.5  | Wartung, Instandhaltung, Monitoring.....                                                                                             | 116 |
| A.9      | Beleuchtung .....                                                                                                                    | 117 |
| A.9.1    | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Beleuchtung 117                                                    |     |
| A.9.1.1  | Anwendungsbereich der Beleuchtung und einsatzbestimmende Eigenschaften .....                                                         | 117 |
| A.9.1.2  | Einführung: Grundbegriffe der Beleuchtung .....                                                                                      | 117 |
| A.9.1.3  | Qualitative und quantitative Relevanz der Beleuchtung im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes.....                           | 118 |
| A.9.2    | Angaben zu Beleuchtungssystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung der Bagatellschwellen) .....                   | 119 |
| A.9.2.1  | Lichtkonzept und Beleuchtungsplanung.....                                                                                            | 119 |
| A.9.2.2  | Leuchtmittel.....                                                                                                                    | 120 |
| A.9.2.3  | Lichtmanagement .....                                                                                                                | 122 |
| A.10     | Trocknungsprozesse.....                                                                                                              | 124 |
| A.10.1   | Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Trocknungs-, Trennungs- und Konzentrationsprozesse .....           | 124 |
| A.10.1.1 | Definition von Trocknungs-, Trennungs- und Konzentrationsprozessen und Abgrenzung zu anderen BVT-Merkblättern .....                  | 124 |
| A.10.1.2 | Typische Trocknungsprozesse und Trocknerbautypen.....                                                                                | 124 |
| A.10.2   | Berechnung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz von Trocknungsprozessen ..                                                    | 127 |
| A.10.3   | Stand der Technik bezüglich des Energiebedarfs von Trocknungsprozessen.....                                                          | 128 |
| A.10.4   | Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Trocknern .....                                                                    | 129 |

|        |                                                                        |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| A.10.5 | Angaben zu Trocknungsprozessen im Rahmen eines Antragsverfahrens ..... | 130 |
| B.     | Literaturverzeichnis .....                                             | 132 |

## Abbildungsverzeichnis

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung A.1-1: | Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung .....                                                                                                                                                                                                                | 23 |
| Abbildung A.1-2: | Energieströme des Bilanzraumes Industrieofen.....                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Abbildung A.1-3: | Schema rekuperativer Brenner .....                                                                                                                                                                                                                         | 26 |
| Abbildung A.1-4: | Schematische Darstellung der Einsparung an elektrischer Hilfsenergie durch<br>Drehzahlregelung bei Gebläsebrennern.....                                                                                                                                    | 29 |
| Abbildung A.2-1: | Typisches Dampfsystem mit Erzeugung, Verteilung, Nutzung und<br>Rückgewinnung.....                                                                                                                                                                         | 32 |
| Abbildung A.2-2: | Schema zur Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes Dampfsystem im<br>Antragsverfahren .....                                                                                                                                                                  | 35 |
| Abbildung A.2-3: | Entstehender Entspannungsdampf in Abhängigkeit vom Druckverhältnis .....                                                                                                                                                                                   | 41 |
| Abbildung A.4-1: | Drehmoment-über-Drehzahl-Kennlinienfeld mit Referenzpunkten für die<br>elektrische Verlustleistung nach DIN EN 61800-9-2.....                                                                                                                              | 60 |
| Abbildung A.4-2: | Vereinfachte Übersicht praxisüblicher Motorbauarten .....                                                                                                                                                                                                  | 61 |
| Abbildung A.4-3: | Schnitt durch den Rotor eines Synchron-Reluktanzmotors .....                                                                                                                                                                                               | 63 |
| Abbildung A.4-4: | Beispielhafter Vergleich der elektrischer Wirkungsgrade zweier 7,5 kW<br>Drehstrommotoren unterschiedlicher Bauart unter Teillastbedingungen .....                                                                                                         | 63 |
| Abbildung A.4-5: | Vor- und Nachteile energieeffizienter Bauarten von Drehstrommotoren.....                                                                                                                                                                                   | 65 |
| Abbildung A.4-6: | Wirkungsgrade netzbetriebener Asynchronmotoren unterschiedlicher<br>Effizienzklassen am Beispiel eines 4-poligen Motors .....                                                                                                                              | 68 |
| Abbildung A.4-7: | Typische Wirkungsgradbelastungskurven für Drehstrom-Induktionsmotoren<br>mit Käfigläufer (Asynchronmotoren) verschiedener Leistungsbereiche.....                                                                                                           | 70 |
| Abbildung A.4-8: | Verteilung der Lebenszykluskosten eines 11 kW- IE3-Motors mit 4.000<br>Betriebsstunden/a über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren .....                                                                                                               | 73 |
| Abbildung A.5-1: | Schema zur Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes Druckluft im<br>Antragsverfahren .....                                                                                                                                                                    | 76 |
| Abbildung A.5-2: | Typische Einsatzbereiche von Kompressorenbauarten.....                                                                                                                                                                                                     | 80 |
| Abbildung A.5-3: | Spezifischer Leistungsbedarf für die Drucklufterzeugung .....                                                                                                                                                                                              | 81 |
| Abbildung A.5-4: | Minimierung der Systemdruckschwankungen nahe am Solldruck durch<br>übergeordnete Regelstrategien: Je schmaler das Druckband und je näher<br>dieses am Solldruck $p_{\text{Bedarf}}$ geführt wird, desto energieeffizienter ist die<br>Regelstrategie. .... | 82 |
| Abbildung A.5-5: | Exergieflussdiagramme (Links ohne und rechts mit Wärmerückgewinnung)<br>für ein Anwendungsbeispiel einer industriellen Druckluftanlage (nach (48)).....                                                                                                    | 83 |
| Abbildung A.5-6: | Exergieverluste in einer beispielhaften herkömmlichen pneumatischen<br>Anwendung, Fortführung aus Abbildung A.5-5 .....                                                                                                                                    | 84 |
| Abbildung A.5-7: | Aufteilung der Druckluftkosten in Abhängigkeit von Betriebsstunden.....                                                                                                                                                                                    | 85 |
| Abbildung A.6-1: | Beispielhafte Anlagenkennlinien im Q/H-Diagramm, ergänzt .....                                                                                                                                                                                             | 90 |
| Abbildung A.6-2: | Klassifizierung von Strömungs- und Verdrängerpumpen.....                                                                                                                                                                                                   | 91 |
| Abbildung A.6-3: | Typische Betriebsbereiche der Bauarten von Kreiselpumpen .....                                                                                                                                                                                             | 92 |
| Abbildung A.6-4: | Typische Kennlinien einer Kreiselpumpe. Förderhöhe, Leistungsaufnahme,<br>Wirkungsgrad und NPSH (Haltedruckhöhe) werden als Funktion des<br>Förderstroms dargestellt .....                                                                                 | 94 |

|                  |                                                                                           |     |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung A.6-5: | Regelungsmethoden zur Reduzierung des Förderstroms von Pumpen im Vergleich .....          | 97  |
| Abbildung A.6-6: | Kostenverteilung einer beispielhaften Kreiselpumpe über deren gesamten Lebenszyklus ..... | 99  |
| Abbildung A.7-1: | Veranschaulichung der verschiedenen Aufgaben lufttechnischer Systeme .....                | 102 |
| Abbildung A.8-1: | Darstellung der Luftarten .....                                                           | 114 |
| Abbildung A.9-1: | Beispielhafte Energieeinsparpotenziale für Bürobeleuchtung.....                           | 117 |
| Abbildung A.9-2: | Übersicht gebräuchlicher Leuchtmittel .....                                               | 121 |
| Abbildung A.9-3: | Lichtausbeuten verschiedener Leuchtmittel .....                                           | 121 |
| Abbildung A.9-4: | Energieeffizienzklassen für Lampen entsprechend der EU-Verordnung Nr. 874/2012 .....      | 122 |

## Tabellenverzeichnis

|                 |                                                                                                                      |     |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle A.1-1:  | Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen .....                                     | 19  |
| Tabelle A.1-2:  | Übersicht über Brenner für Industrieöfen.....                                                                        | 27  |
| Tabelle A.1-3:  | Vorschlag von Ökodesign- Mindestanforderungen an das Luftverhältnis bei Industrieöfen .....                          | 28  |
| Tabelle A.1-4:  | Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen .....                                 | 30  |
| Tabelle A.2-1:  | Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Dampfverteilung.....                        | 37  |
| Tabelle A.2-2:  | Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Rückgewinnung .....                         | 40  |
| Tabelle A.2-3:  | Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Dampferzeugung .....                        | 42  |
| Tabelle A.4-1:  | Energiesparende Maßnahmen und typische Einsparungen.....                                                             | 73  |
| Tabelle A.5-1:  | Beispiele für mögliche Alternativlösungen.....                                                                       | 77  |
| Tabelle A.6-1:  | Eignungsbereiche gebräuchlicher Pumpentypen, ergänzt.....                                                            | 93  |
| Tabelle A.7-1:  | Ab 2015 geltende Wirkungsgrade für Ventilatoren gemäß Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 Angabe der Stützwerte* ..... | 105 |
| Tabelle A.10-1: | Grundsätzliche Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz des thermischen Trocknungsvorgangs .....    | 129 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                 |                                                                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>AC</b>       | <b>(Alternating Current), Wechselstrom</b>                                                      |
| <b>AFD</b>      | <b>(Adjustable Frequency Drive), frequenzvariabler Antrieb</b>                                  |
| <b>AIG</b>      | <b>Arbeitsgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik</b>                                        |
| <b>AI-RCF</b>   | <b>(Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres), Feuerfeste Keramikfasern aus Aluminosilikat</b> |
| <b>ASR</b>      | <b>Arbeitsstättenrichtlinie</b>                                                                 |
| <b>BImSchV</b>  | <b>Bundes-Immissionsschutzverordnung</b>                                                        |
| <b>BMU</b>      | <b>Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit</b>                        |
| <b>BMWi</b>     | <b>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie</b>                                             |
| <b>BREF</b>     | <b>(Best Available Techniques Reference Document), BVT-Merkblatt</b>                            |
| <b>BVT</b>      | <b>Beste Verfügbare Technik</b>                                                                 |
| <b>BVU</b>      | <b>Bidirektionale ventilatorgestützte Lüftungsanlage</b>                                        |
| <b>CAS</b>      | <b>(Compressed Air Systems), Druckluftsysteme</b>                                               |
| <b>CBA</b>      | <b>Cost-benefit analysis</b>                                                                    |
| <b>cd</b>       | <b>Candela</b>                                                                                  |
| <b>CEN</b>      | <b>(Comité Européen de Normalisation), Europäisches Komitee für Normung</b>                     |
| <b>CIE</b>      | <b>(Commission Internationale de l'Eclairage), Internationale Beleuchtungskommission</b>        |
| <b>COP</b>      | <b>(Coefficient of Performance), Leistungszahl im Heizbetrieb</b>                               |
| <b>DC</b>       | <b>(Direct Current), Gleichstrom</b>                                                            |
| <b>Dena</b>     | <b>Deutsche Energie-Agentur GmbH</b>                                                            |
| <b>DIN</b>      | <b>Deutsches Institut für Normung, Deutsche Industrienorm</b>                                   |
| <b>DS</b>       | <b>Dunkelstrahler</b>                                                                           |
| <b>DSP</b>      | <b>Deckenstrahlplatten</b>                                                                      |
| <b>E</b>        | <b>Beleuchtungsstärke</b>                                                                       |
| <b>EBPD</b>     | <b>(Energy Performance of Buildings Directive), Europäische Gebäuderichtlinie</b>               |
| <b>EC-Motor</b> | <b>„Electronically commutated“ Motor</b>                                                        |
| <b>ECO</b>      | <b>(Economiser), Speisewasservorwärmer</b>                                                      |
| <b>EEI</b>      | <b>Energie-Effizienz-Index oder Energie-Effizienz-Indikator (anderer Kontext)</b>               |
| <b>EEM</b>      | <b>Energieeffizienter Motor</b>                                                                 |
| <b>EER</b>      | <b>(Energy Efficiency Ratio), Leistungszahl im Kühlbetrieb</b>                                  |
| <b>EEV</b>      | <b>Elektronisches Expansionsventil</b>                                                          |
| <b>EG</b>       | <b>Europäische Gemeinschaft</b>                                                                 |
| <b>EGS</b>      | <b>Ecosystem Goods and Services</b>                                                             |
| <b>ElektroG</b> | <b>Elektro- und Elektronikgerätegesetz</b>                                                      |

|                        |                                                                                                                                                            |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EMAS</b>            | <b>Eco-Management and Audit Scheme, Öko-Audit</b>                                                                                                          |
| <b>E<sub>min</sub></b> | <b>Minimale Beleuchtungsstärke</b>                                                                                                                         |
| <b>E<sub>m</sub></b>   | <b>Wartungswert der Beleuchtungsstärke</b>                                                                                                                 |
| <b>EMDS</b>            | <b>(Electric Motor - Drive System), elektromotorisch angetriebenes System</b>                                                                              |
| <b>EN</b>              | <b>Europäische Norm</b>                                                                                                                                    |
| <b>ENE</b>             | <b>(Energy Efficiency), Energieeffizienz</b>                                                                                                               |
| <b>ENE BREF</b>        | <b>(Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency), Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken (BVT) für Energieeffizienz</b> |
| <b>EnEV</b>            | <b>Energieeinsparverordnung</b>                                                                                                                            |
| <b>EnMS</b>            | <b>Energiemanagementsystem</b>                                                                                                                             |
| <b>EPI</b>             | <b>(Energy Performance Indicator), Energieleistungskennzahl</b>                                                                                            |
| <b>ErP</b>             | <b>(Energy-related Products), energieverbrauchsrelevante Produkte</b>                                                                                      |
| <b>E<sub>v</sub></b>   | <b>vertikale Beleuchtungsstärke</b>                                                                                                                        |
| <b>EVG</b>             | <b>elektronisches Vorschaltgerät</b>                                                                                                                       |
| <b>EVU</b>             | <b>Energieversorgungsunternehmen</b>                                                                                                                       |
| <b>E<sub>z</sub></b>   | <b>zylindrische Beleuchtungsstärke</b>                                                                                                                     |
| <b>F/F</b>             | <b>Flüssigkeit/Flüssigkeit</b>                                                                                                                             |
| <b>FLOX</b>            | <b>Flammenlose Oxidation</b>                                                                                                                               |
| <b>F/G</b>             | <b>Flüssigkeit/Gas</b>                                                                                                                                     |
| <b>FU</b>              | <b>Frequenzumrichter</b>                                                                                                                                   |
| <b>G/G</b>             | <b>Gas/Gas</b>                                                                                                                                             |
| <b>GuD</b>             | <b>Gas-und-Dampf-Kombikraftwerk</b>                                                                                                                        |
| <b>GWP</b>             | <b>(Global Warming Potential), Erderwärmungspotenzial</b>                                                                                                  |
| <b>HELCOM</b>          | <b>Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area).</b>               |
| <b>HS</b>              | <b>Hellstrahler</b>                                                                                                                                        |
| <b>HVAC</b>            | <b>(Heating, Ventilation and Air Conditioning), Heizung, Lüftung und Klimatisierung</b>                                                                    |
| <b>HTW</b>             | <b>Hochtemperaturwolle</b>                                                                                                                                 |
| <b>IE</b>              | <b>(International Efficiency class), Internationale Effizienzklasse</b>                                                                                    |
| <b>IE1</b>             | <b>Standard Effizienz</b>                                                                                                                                  |
| <b>IE2</b>             | <b>Hohe Effizienz</b>                                                                                                                                      |
| <b>IE3</b>             | <b>Premium Effizienz</b>                                                                                                                                   |
| <b>IE4</b>             | <b>Super Premium Effizienz</b>                                                                                                                             |
| <b>IE5</b>             | <b>Ultra Premium Effizienz</b>                                                                                                                             |
| <b>IEA</b>             | <b>(International Energy Agency), Internationale Energieagentur</b>                                                                                        |
| <b>IED</b>             | <b>(Industrial Emissions Directive), Industrieemissionsrichtlinie</b>                                                                                      |

|        |                                                                                                                                                                    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IDA-C1 | Konstant laufende Anlagen                                                                                                                                          |
| IDA-C2 | Manuell regelbare Anlagen                                                                                                                                          |
| IDA-C3 | Selbstregelnde Anlagen mit vorgegebenem Zeitplan                                                                                                                   |
| IDA-C4 | Belegungsabhängig geregelte Anlagen mit Auslöser                                                                                                                   |
| IDA-C5 | Bedarfsabhängig geregelte Anlagen                                                                                                                                  |
| IDA-C6 | Sensorisch erfasste bedarfsabhängig geregelte Anlagen                                                                                                              |
| IGCC   | (Integrated Gasification Combined Cycle), Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung                                                                                 |
| ISO    | (International Organization for Standardization), Internationale Organisation für Normung, Internationale Norm                                                     |
| JAZ    | Jahresarbeitszahl                                                                                                                                                  |
| KMU    | Kleine und mittlere Unternehmen                                                                                                                                    |
| KWK    | Kraft-Wärme-Kopplung                                                                                                                                               |
| KWKK   | Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung                                                                                                                                         |
| KVG    | Konventionelle Vorschaltgeräte                                                                                                                                     |
| LED    | (Light Emitting Diode), Leuchtdiode                                                                                                                                |
| LiTG   | Deutsche Lichttechnische Gesellschaft                                                                                                                              |
| LCC    | (Life Cycle Costs), Lebenszykluskosten                                                                                                                             |
| LCP    | (Large Combustion Plants), Großfeuerungsanlagen                                                                                                                    |
| LH     | Luftheizer / Lufterhitzer                                                                                                                                          |
| LLMF   | (Lamp Lumen Maintenance Factor), Lampenlichtstrom-Wartungsfaktor                                                                                                   |
| LMF    | (Luminaire Maintenance Factor), Leuchtenwartungsfaktor                                                                                                             |
| lm     | Lumen                                                                                                                                                              |
| LNG    | (Liquefied Natural Gas), Flüssigerdgas/ verflüssigtes Erdgas                                                                                                       |
| LSF    | (Lamp Survival Factor), Lampenlebensdauerfaktor                                                                                                                    |
| LuVo   | Luftvorwärmer                                                                                                                                                      |
| LVB    | Leipziger Verkehrsbetriebe GmbH                                                                                                                                    |
| lx     | Lux                                                                                                                                                                |
| MA     | Mitarbeiter                                                                                                                                                        |
| MEI    | Mindest-Effizienz-Index                                                                                                                                            |
| MF     | (Maintenance Factor), Wartungsfaktor                                                                                                                               |
| MVR    | (Mechanical Vapor Recompression), Mechanische Brüdenkompression                                                                                                    |
| NACE   | (Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne), Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft |
| NEC    | (National Emission Ceilings Directive), Richtlinie über nationale Emissionshöchstmenge für bestimmte Luftschadstoffe                                               |

|                      |                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>NPSH</b>          | <b>(net positive suction head), Haltedruckhöhe</b>                                                                                                                                                                    |
| <b>OLED</b>          | <b>(organic light emitting diode), organische Leuchtdiode</b>                                                                                                                                                         |
| <b>ODA</b>           | <b>Außenluft (DIN EN 16798-3)</b>                                                                                                                                                                                     |
| <b>ODP</b>           | <b>(Ozon Depletion Potential), Ozonzerstörungspotenzial</b>                                                                                                                                                           |
| <b>PCM</b>           | <b>(Phase Change Material), Phasenwechselmaterial</b>                                                                                                                                                                 |
| <b>PM</b>            | <b>Permanent-Magnet</b>                                                                                                                                                                                               |
| <b>PN</b>            | <b>(Pressure Nominal), Nenndruck</b>                                                                                                                                                                                  |
| <b>Ra</b>            | <b>allgemeiner Referenzindex, Farbwiedergabeindex</b>                                                                                                                                                                 |
| <b>REACH</b>         | <b>(Regulation concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), Europäische Chemikalienverordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe</b> |
| <b>R<sub>G</sub></b> | <b>Blendwert</b>                                                                                                                                                                                                      |
| <b>RGB-Mischung</b>  | <b>Mischung des Lichtes von roten, grünen und blauen LED</b>                                                                                                                                                          |
| <b>RMF</b>           | <b>(Room Maintenance Factor), Raumwartungsfaktor</b>                                                                                                                                                                  |
| <b>RLT</b>           | <b>Raumluftechnische Anlagen</b>                                                                                                                                                                                      |
| <b>RoHS</b>          | <b>(Restriction of certain Hazardous Substances Directive), Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten</b>                                           |
| <b>ROI</b>           | <b>(Return on Investment), Kapitalrendite/ Anlagenrendite</b>                                                                                                                                                         |
| <b>SCR</b>           | <b>(Selective Catalytic Reduction), Selektive Katalytische Reduktion</b>                                                                                                                                              |
| <b>SER</b>           | <b>(Specific Energy Requirement), spezifischer Leistungsbedarf</b>                                                                                                                                                    |
| <b>SEER</b>          | <b>(Saisonal Energy Efficiency Ration), jahreszeitbedingte Leistungszahl im Kühlbetrieb</b>                                                                                                                           |
| <b>SP</b>            | <b>Speichermedium</b>                                                                                                                                                                                                 |
| <b>SPEC</b>          | <b>(Specification), Spezifikationen</b>                                                                                                                                                                               |
| <b>STIG</b>          | <b>(Steam Injected Gas Turbine), „Cheng-Prozess“, Gasturbine mit Abwärmenutzung durch Dampferzeugung und Rückführung in die Brennkammer</b>                                                                           |
| <b>SUP</b>           | <b>Zuluft (DIN EN 16798-3)</b>                                                                                                                                                                                        |
| <b>SVHC</b>          | <b>(Substances of Very High Concern), besonders besorgniserregende Stoffe</b>                                                                                                                                         |
| <b>TA Luft</b>       | <b>Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft</b>                                                                                                                                                                  |
| <b>Tcp</b>           | <b>Farbtemperatur</b>                                                                                                                                                                                                 |
| <b>TDS</b>           | <b>(Total Dissolved Solids), Gesamtgehalt an gelösten Feststoffen</b>                                                                                                                                                 |
| <b>THG</b>           | <b>Treibhausgas</b>                                                                                                                                                                                                   |
| <b>TEV</b>           | <b>Thermostatisches Expansionsventil</b>                                                                                                                                                                              |
| <b>TOC</b>           | <b>(Total Organic Carbon), gesamter organischer Kohlenstoff</b>                                                                                                                                                       |
| <b>UGR</b>           | <b>(Unified Glare Rating), vereinheitlichte Blendungsbewertung</b>                                                                                                                                                    |
| <b>UMS</b>           | <b>Umwelt-Managementsystem</b>                                                                                                                                                                                        |



|               |                                                                                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UNEP</b>   | <b>(United Nations Environment Programme), Umweltprogramm der Vereinten Nationen</b>                              |
| <b>Uo</b>     | <b>Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke</b>                                                                     |
| <b>UVU</b>    | <b>Unidirektionale ventilatorgestützte Lüftungsanlagen</b>                                                        |
| <b>VDI</b>    | <b>Verein Deutscher Ingenieure</b>                                                                                |
| <b>VDMA</b>   | <b>Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau</b>                                                                |
| <b>VSD</b>    | <b>(Variable Speed Drive), drehzahlregelbarer Antrieb</b>                                                         |
| <b>VVG</b>    | <b>verlustarmes Vorschaltgerät</b>                                                                                |
| <b>WHG</b>    | <b>Wasserhaushaltgesetz</b>                                                                                       |
| <b>WQ</b>     | <b>Wärmequelle</b>                                                                                                |
| <b>WS</b>     | <b>Wärmesenke</b>                                                                                                 |
| <b>WT</b>     | <b>Wärmeträger</b>                                                                                                |
| <b>Zr-RCF</b> | <b>(Zirconia Aluminosilicate Refractory Ceramic Fibres), feuerfeste Keramikfasern aus Zirkoniumaluminosilikat</b> |

## A. Beitrag für eine Vollzugshilfe zur Berücksichtigung des Themenbereichs Energieeffizienz von Querschnittstechnologien bei umweltrechtlichen Genehmigungsverfahren

### A.1 Feuerungsanlagen

#### A.1.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Feuerungsanlagen

##### A.1.1.1 *Definition von Feuerungsanlagen und Abgrenzung zu anderen BVT-Merkblättern und umweltschutzbezogenen Vorschriften*

Feuerungsanlagen dienen der Umwandlung von in Brennstoffen gebundener chemischer Energie in thermische Energie, um Temperaturen oberhalb der Umgebungstemperatur zu erreichen. Das unmittelbar im Verbrennungsprozess entstehende Trägermedium der Wärmeenergie ist das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas. Über entsprechende Transport- und Übertragungsprozesse (meist Kombination aus Strahlung, Wärmeleitung, Konvektion) gelangt die Wärmeenergie anschließend zum Zielprozess. Oft wird die Energie zunächst auf andere Wärmeträger (Wasser, Thermoöl oder Luft) übertragen.

Wegen der in den Rauchgasen enthaltenen Stoffe mit Gefährdungspotenzial für die Umwelt (zusammengefasst im weiteren als Emissionen bezeichnet) unterliegen fast alle industriellen Anlagen, die Feuerungsanlagen beinhalten, entsprechenden immissionsschutzrechtlichen Vorschriften. Diese beinhalten teilweise auch die Energieeffizienz betreffende Kriterien, welche sowieso Prüfgegenstand in Genehmigungsverfahren sind. Auf diese wird in diesem Dokument nicht mehr explizit eingegangen.

Für Aspekte der Energieeffizienz ist der Zweck der Wärmeerzeugung von Bedeutung, dabei werden häufig folgende Begriffe verwendet:

- ▶ Heizkessel: Feuerungsanlagen, in denen die erzeugte Wärme zur Bereitstellung von Heizwasser oder Dampf genutzt wird.
- ▶ Thermoprozessanlagen (Industrieöfen): Feuerungsanlagen, in denen die erzeugte Wärme direkt an ein Nutzgut zur thermochemischen und thermophysikalischen Behandlung übertragen wird. Für die erstgenannte Gruppe der Feuerungsanlagen zur Erzeugung von Dampf oder Heißwasser wurde im Jahr 2017 ein aktualisiertes BVT-Merkblatt für große Feuerungsanlagen ( (1), engl. „Large Combustion Plants“, daher kurz LCP-BREF genannt) mit einer Feuerungswärmeleistung größer 50 MW durch die EU-Kommission veröffentlicht. Es enthält umfangreiche Ausführungen und Richtwerte zur Gestaltung von Feuerungsanlagen nach der besten verfügbaren Technik, welche zumindest qualitativ auch auf kleinere Feuerungsanlagen übertragbar ist. Das LCP-BREF 2017 ist wegen seiner Aktualität als Maßstab zur Beurteilung der besten verfügbaren Techniken für diese Anlagengruppe heranzuziehen. Auf die Wiedergabe der einzelnen Inhalte wird an dieser Stelle verzichtet, stattdessen werden in der nachfolgenden Tabelle A.1-1 detaillierte Verweise zu den energieeffizienzrelevanten Abschnitten des LCP-BREF aufgelistet. Die Prüfung der Anwendbarkeit der dort benannten Techniken ist entsprechend des Brennstofftyps als erster Schritt zu empfehlen.

Tabelle A.1-1: Maßnahmen/Techniken zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen

|                                                                 | Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel |                                                         |                   |              |                                       |                                  | Maßnahmen/<br>Techniken in<br>diesem Dokument<br>nach Kapitel |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                                 | Allg.<br>Beschreibung/<br>Energieeffizienz                                 | Kohle und<br>Braunkohle                                 | Biomasse und Torf | Müll         | Flüssige<br>Brennstoffe               | Gasförmige<br>Brennstoffe        |                                                               |
| Brennstoffwahl                                                  | 3.1.1.4                                                                    | 5.1.3.2                                                 | 5.2.3.2           |              | 6.3.2.3                               |                                  | 3.1.4                                                         |
| Brennstoffcharakterisierung                                     |                                                                            | 5.1.1.1, 5.1.1.4                                        | 5.2.1.1           | 9.1.3        | 6.1.1                                 | 7.1.1.1, 7.2,<br>7.3.1.1         |                                                               |
| Brennstoffaufbereitung/<br>Konditionierung (Trocknung,<br>etc.) | 3.2.3.18                                                                   | 5.1.1.2 5.1.1.4.1,<br>5.1.3.4.3.1,<br>5.1.3.3, 11.4.1.1 | 5.2.1.2, 5.2.3.3  | 9.1.3, 9.3.2 | 6.1.2                                 | 7.1.3.1, 7.3.1.1                 |                                                               |
| Vergasung                                                       | 4, 4.3.4                                                                   | 4.1.1,                                                  | 4.1.2, 5.2.3.3    | 4.1.3,       |                                       |                                  |                                                               |
| Energieeffizienzmaßnahmen                                       | 3.2.3                                                                      | 5.1.1.3, 5.1.3.3,                                       | 5.2.1.4, 5.2.3.3  | 9.2.3        | 6.2.2, 6.3.2.2,<br>6.3.3.1, 6.3.4.1   | 7.1.3.1, 7.3.3.1,<br>7.4.3.2     |                                                               |
| Wärmerückgewinnung/<br>Reduktion der<br>Abgastemperatur         | 3.2.3.1                                                                    | 5.1.3.3                                                 | 5.2.3.3           |              |                                       | 7.1.3.1, 7.4.3.2                 | 3.1.1, 3.1.2                                                  |
| Kraft-Wärme-Kopplung                                            | 2.5, 3.2.3.2                                                               | 5.1.3.3                                                 | 5.2.3.3           |              | 6.3.2.2, 6.3.3.1,<br>6.3.4.1          | 7.1.3.1, 7.1.3.1.3.1             | 3.4                                                           |
| Cheng-Cycle/Steam Injected<br>Gas Turbine (STIG)                | 3.2.3.3                                                                    |                                                         |                   |              |                                       | 7.1.3.2.2                        |                                                               |
| Verbrennungsluft-vorwärmung                                     | 3.2.3.4                                                                    |                                                         |                   |              |                                       | 7.1.3.1                          | 3.1.1                                                         |
| Einsatz moderner Werkstoffe                                     | 3.2.3.5                                                                    | 5.1.3.3                                                 |                   |              | 6.3.2.2                               | 7.1.3.1                          |                                                               |
| Zweifache<br>Zwischenüberhitzung                                | 3.2.3.6                                                                    | 5.1.3.3                                                 | 5.2.3.3           |              | 6.3.2.2                               | 7.1.3.1                          |                                                               |
| Speisewasservorwärmung<br>unter Nutzung<br>rückgewonnener Wärme | 3.2.3.7                                                                    | 5.1.3.3                                                 | 5.2.3.3           |              | 6.3.2.2                               | 7.1.3.1                          | 3.1.1, 3.2.4                                                  |
| Moderne Steuerungssysteme                                       | 3.2.3.8                                                                    | 5.1.3.2                                                 | 5.2.3.2           |              | 6.3.2.1, 6.3.2.2,<br>6.3.3.1, 6.3.4.1 | 7.1.3.1, 7.1.3.2.1,<br>7.1.3.2.2 | 3.1.3                                                         |
| Wärmespeicherung in KWK<br>oder bei reiner<br>Wärmeerzeugung    | 3.2.3.9                                                                    |                                                         |                   |              | 6.3.2.2, 6.3.3.1                      | 7.1.3.1                          |                                                               |

| Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel |                                            |                         |                   |         |                         |                                                          | Maßnahmen/<br>Techniken in<br>diesem Dokument<br>nach Kapitel |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------|---------|-------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                                            | Allg.<br>Beschreibung/<br>Energieeffizienz | Kohle und<br>Braunkohle | Biomasse und Torf | Müll    | Flüssige<br>Brennstoffe | Gasförmige<br>Brennstoffe                                |                                                               |
| GuD- Prozess mit integrierter Vergasung (IGCC)                             | 3.2.3.10                                   | 4.1.1, 5.1.3.3          | 4.1.2             | 4.1.3   |                         |                                                          |                                                               |
| GuD-Prozess (LCP BREF: Combined-cycle combustion)                          | 3.2.3.11                                   |                         |                   |         | 6.3.3.1, 6.3.4.1        | 7.1.3.1                                                  |                                                               |
| Topping-cycle                                                              | 3.2.3.12                                   |                         |                   |         |                         |                                                          |                                                               |
| Upgrade von Dampfturbinen und anderen Komponenten                          | 3.2.3.13                                   | 5.1.3.3                 | 5.2.3.3           |         | 6.3.3.1, 6.3.2.2        |                                                          |                                                               |
| Überkritische Dampfparameter                                               | 3.2.3.14                                   | 5.1.3.3                 |                   |         | 6.3.2.2                 |                                                          |                                                               |
| Rauchgaskondensator                                                        | 3.2.3.15                                   |                         | 5.2.3.3           |         |                         |                                                          | 3.1.1                                                         |
| Cooling tower air emission discharge (LCP BREF)                            | 3.2.3.16                                   | 5.1.3.3                 |                   |         | 6.3.2.2                 |                                                          |                                                               |
| Nasskamin (LCP BREF: wet stack)                                            | 3.2.3.17                                   | 5.1.3.3                 |                   |         |                         |                                                          |                                                               |
| Brennstoffvorwärmung und -trocknung                                        | 3.2.3.18                                   | 5.1.3.3                 | 5.2.1.2           | 9.1.3.2 |                         | 7.1.3.1                                                  | 3.1.1                                                         |
| Kühlsystem                                                                 | 3.2.3.19                                   |                         |                   |         |                         | 7.1.3.1.3.3<br>Kühlung der eintretenden Verbrennungsluft |                                                               |
| Optimierung der Verbrennung                                                | 3.2.2.7.1                                  | 5.1.3.2                 |                   |         |                         | 7.1.3.2.2                                                | 3.1.3                                                         |
| Integrierter Verbrennungsprozess (Integrated Combustion Process)           | 3.1.1, 3.2.3.8                             | 5.1.3.2                 |                   |         |                         |                                                          |                                                               |
| Wärmerückgewinnung bei Rostkühlung und Wirbelschichtfeuerung               |                                            |                         | 5.2.3.3           |         |                         |                                                          |                                                               |
| Luftstufung                                                                | 3.2.2.3.2                                  | 5.1.3.3                 |                   |         | 6.3.2.3                 | 7.1.3.2.1                                                |                                                               |
| Trockene                                                                   | 3.2.5.2                                    | 5.1.3.3                 |                   |         |                         |                                                          |                                                               |

| Maßnahmen/Techniken im LCP BREF 2017 nach Art des Brennstoffes und Kapitel                                                                 |                                            |                         |                   |      |                         |                           | Maßnahmen/<br>Techniken in<br>diesem Dokument<br>nach Kapitel |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|-------------------|------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                            | Allg.<br>Beschreibung/<br>Energieeffizienz | Kohle und<br>Braunkohle | Biomasse und Torf | Müll | Flüssige<br>Brennstoffe | Gasförmige<br>Brennstoffe |                                                               |
| Brennkammerentaschung                                                                                                                      |                                            |                         |                   |      |                         |                           |                                                               |
| Expansionsturbine zur<br>Rückgewinnung des<br>Energiegehalts von Gasen<br>unter Druck                                                      |                                            |                         |                   |      |                         | 7.1.3.1.2.1               |                                                               |
| Optimierung der<br>Strömungswege (-strecke)                                                                                                |                                            |                         |                   |      |                         | 7.1.3.1.3.2               |                                                               |
| Rekuperativer<br>Gasturbinenprozess                                                                                                        |                                            |                         |                   |      |                         | 7.1.3.1.3.4               |                                                               |
| Energetische Optimierung von<br>Brennern für Industrieöfen<br>Rekuperative Brenner<br>Regenerative Brenner<br>Sauerstofffeuerung (Oxyfuel) |                                            |                         |                   |      |                         |                           | 3.1.2                                                         |
| Reduzierung von Verlusten<br>durch Wärmedämmung und<br>Öffnungen                                                                           |                                            |                         |                   |      |                         |                           | 3.1.5, 3.1.6                                                  |
| Reduktion des<br>Luftüberschusses                                                                                                          |                                            |                         |                   |      | 6.3.2.3                 | 7.1.3.2.1                 | 3.1.3                                                         |

Quelle: (1)

Im Gegensatz dazu ist die Regelungs- und Informationsdichte zur Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen nicht in allen Branchen und Anwendungsfällen vergleichbar hoch. Stellt die Feuerungsanlage einen wichtigen Teil eines IED- Prozesses dar (z. B. Schmelzöfen in der Glas- oder Metallindustrie), werden die verwendeten Techniken in einigen Fällen in den entsprechenden vertikalen Sektoren- BREFs abgehandelt. Darin eingeschlossen sind ebenfalls Daten zur Energieeffizienz und Berechnungen für verschiedene Verbrennungsprozesse. Soweit für Thermoprozessanlagen entsprechende vertikale (auf den entsprechenden Technologiesektor bezogene) BVT-Merkblätter vorliegen, ist ebenfalls die Prüfung der Anwendbarkeit der dort benannten Techniken als erster Schritt zu empfehlen.

#### **A.1.2 Allgemeine Energiebilanz und Effizienz einer Feuerungsanlage**

Die folgenden Informationen gelten sowohl für die Verbrennung fester Brennstoffe in Rost-, Wirbelschicht oder Staubfeuerungen als auch für die Verbrennung flüssiger/gasförmiger Brennstoffe mit Brennern (Düsenysteme). Die Bilanzierung/Betrachtung auf Seiten Nutzwärmestromes erfolgt in anderen Kapiteln, insbesondere zum Wasser-/Dampfsystems in Kapitel A.2.2 sowie zu Trocknungsprozessen in Kapitel A.10. Teilweise Überschneidungen lassen sich jedoch nicht vermeiden.

Als Bilanzraum für die Betrachtung der Energieeffizienz wird für dieses Kapitel die Feuerungsanlage selbst bis zu dem den Nutzwärmestrom aufnehmenden Medium betrachtet. Die zugeführte Energie des Brennstoffstroms und der Verbrennungsluft verteilt sich auf Nutzwärmestrom, Abgasverluste, Verluste über Wände und sonstige Verluste.

Formel A.1-1

---

$$\dot{H}_f + \dot{H}_a = \dot{Q}_p + \dot{H}_g + \dot{Q}_w + \sum \dot{Q}_l$$

$\dot{H}_f$      Enthalpiestrom Brennstoff und chem. gebundene Brennstoffenergie [kW]

$\dot{H}_a$      Enthalpiestrom Verbrennungsluft (Oxidationsmittel) [kW]

$\dot{Q}_p$      Prozess-/Nutzwärmestrom [kW]

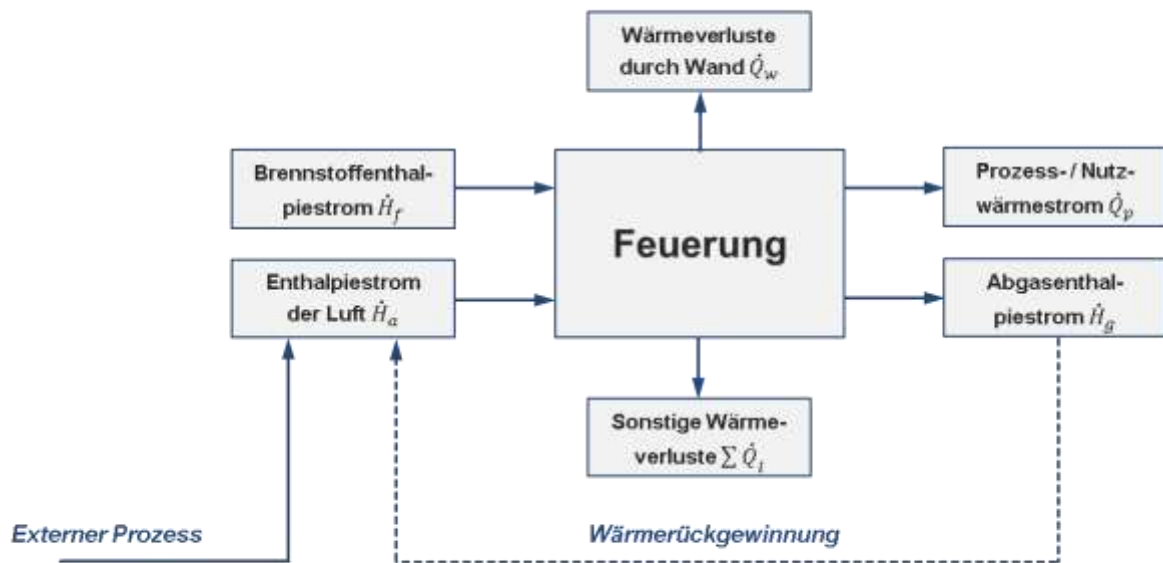
$\dot{H}_g$      Abgasverlustenthalpiestrom [kW]

$\dot{Q}_w$      Verlustwärmestrom über Wände [kW]

$\sum \dot{Q}_l$    Sonstige Verlustenergieströme [kW]

In Abbildung A.1-1 werden die ein- und ausgehenden Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung schematisch dargestellt.

Abbildung A.1-1: Wärmeströme des Bilanzraumes Feuerung



Quelle: eigene Abbildung, Hochschule Zittau-Görlitz, 2016

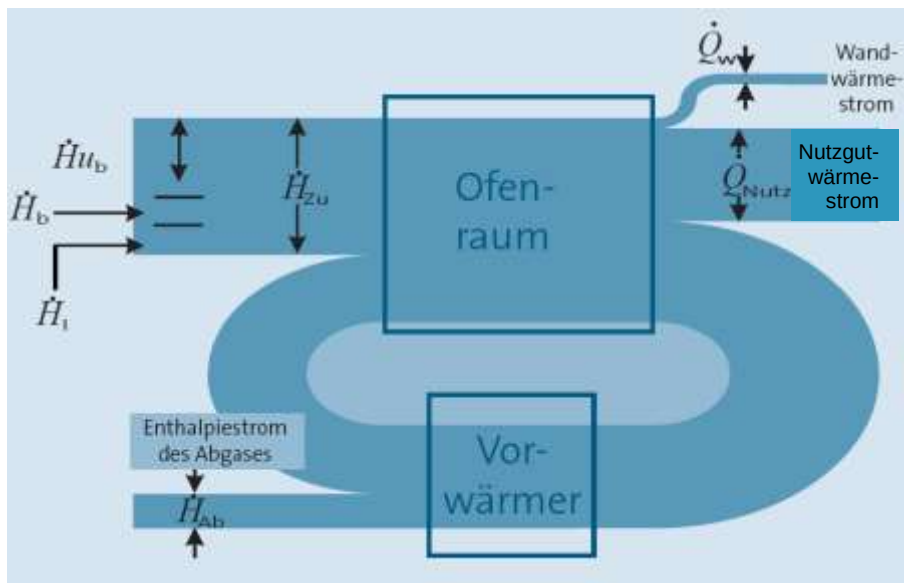
Der Brennstoffenthalpiestrom  $\dot{H}_f$  ist das Produkt aus zugeführtem Brennstoffmassenstrom und seinem Heiz- bzw. Brennwert.

Die Prozess- bzw. Nutzwärme  $\dot{Q}_p$  ist die freigesetzte thermische Energie, die entweder direkt auf ein zu erwärmendes Gut oder indirekt mittels Wärmeübertrager aus der Feuerung ausgekoppelt wird (z. B. Dampf- oder Heißwassererzeugung). Die für die Anwendung/den Prozess tatsächlich zur Verfügung stehende thermische Energie hängt von den Wärmeverlusten ab.

Zusätzlich zu den Wärmeverlusten muss auch der Energiebedarf für den Betrieb von Hilfsaggregaten in Betracht gezogen werden (Förder-, Zerkleinerungs- und Reinigungstechnik, z. B. Ausrüstung für den Transport von Brennstoff, Kohlenmühlen, Pumpen und Ventilatoren, Systeme für die Entfernung von Asche, Säuberung der Heizflächen, etc.).

Die energetische Bilanzierung kann für viele Thermoprozessanlagen nach folgendem Schema erfolgen:

Abbildung A.1-2: Energieströme des Bilanzraumes Industrieofen



Quelle: (2 S. 11)

- $\dot{H}_{u_b}$  Chemischer Enthalpiestrom des Brennstoffes [kW]
- $\dot{H}_b$  Kalorischer Enthalpiestrom des Brennstoffes [kW]
- $\dot{H}_l$  Kalorischer Enthalpiestrom der Verbrennungsluft [kW]
- $\dot{H}_{zu}$  Zuführter Enthalpiestrom [kW]
- $\dot{H}_{Ab}$  Enthalpiestrom des Abgases [kW]
- $\dot{Q}_{Nutz}$  Nutzwärmestrom [kW]
- $\dot{Q}_w$  Wandwärmestrom [kW]

Strategien zur Erhöhung der Energieeffizienz beruhen vorrangig auf der Reduzierung der Verlustwärmeströme.

Bei der Erhöhung der Effizienz von Feuerungsanlagen sollte grundsätzlich folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Prüfung des Bedarfes an Nutzenergie (Menge und Temperaturniveau) entsprechend den prozesstechnischen Erfordernissen, Auslegung der Anlage entsprechend Bedarf,
2. Reduzierung von Anlagenverlusten,
3. Nutzung der Abwärme.

### A.1.3 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen

#### A.1.3.1 Reduzierung der Abgastemperatur

Der Abgasverlust stellt den größten Einzelverlust einer Feuerungsanlage dar. Er ist proportional zur Abgastemperatur. Als Orientierungswert gilt, dass mit Senkung der Abgastemperatur um ca. 20 °C eine Steigerung der Effizienz um 1 % erzielt werden kann.

Um Abgasverluste möglichst niedrig zu halten, sollten folgende Maßnahmen beachtet werden:

*Dimensionierung Auslegung der Feuerungsanlage*



Die Verbrennungsleistung der Feuerungsanlage soll für die maximal benötigte Nutzwärmeleistung ausgelegt sein, wobei ein angemessener Sicherheitsfaktor für Überlasten einbezogen werden sollte. Feuerungswärmeleistung und nachfolgende Wärmeübertrager müssen aufeinander abgestimmt sein. Überlasten am Wärmeübertrager führen zu einem Anstieg der Abgastemperatur, da die Wärmeübertragerfläche konstant bleibt. Teillastbetrieb kann zu einem erhöhten Verbrennungsluftbedarf und damit zu einem ebenfalls erhöhten Abgasverlust führen. Weiterhin bleiben im Teillastfall die Oberflächenverluste bezogen auf den Vollastfall weitgehend unverändert. Daher steigen im Teillastbetrieb prozentual die Oberflächenverluste.

#### *Wirkungsgrad der Nutzwärmeauskopplung*

Erfolgt die Auskopplung der Nutzwärme über Wärmeübertrager, sind diese regelmäßig von Ablagerungen wie Flugasche und Ruß zu reinigen. Eine regelmäßige Reinigung sollte im Zuge von Wartungsarbeiten erfolgen. Anlagen, in denen feste Brennstoffe zum Einsatz kommen, sind besonders anfällig für Verschmutzungen und sollten daher Einrichtungen zur Reinigung der Wärmeübertrager besitzen, die eine regelmäßige Reinigung zwischen den Wartungsterminen ermöglichen.

#### *Wärmerückgewinnung aus dem Abgas*

Durch Installation von Technologien zur Wärmerückgewinnung kann die Effizienz weiter erhöht werden, wobei folgende Reihenfolge beachtet werden sollte:

1. Anlagen- oder prozessinterne Nutzung: Die Wärmerückgewinnung kann direkt in den Brenner integriert sein (z. B. regenerative und rekuperative Brenner, Kapitel A.1.3.2) oder über Wärmeübertrager zum Vorwärmen von Verbrennungsluft (Luftvorwärmer) oder Speisewasser (Economiser, Kapitel 3.2.5) erfolgen. Weiterhin kann die rückgewonnene Wärme zur Trocknung und/oder Erwärmung von Brenn-, Roh- und Hilfsstoffen sowie Nutzgut genutzt werden
2. Betriebsinterne Abwärmenutzung (z. B. für Raumheizung, Warmwassererwärmung oder andere Wärmeverbraucher)
3. Externe Wärmenutzung (z. B. über Nahwärmenetze)

#### *Beachtung von Tau- bzw. Kondensationspunkten*

Abhängig von der Brennstoffzusammensetzung kann es beim Einsatz von schwefelhaltigen Brennstoffen bei Unterschreitung bestimmter Abgastemperaturen (meist im Bereich zwischen 120 – 150 °C) zur Bildung von Schwefelsäuren kommen. Ein Absinken der Abgastemperatur unter die Taupunkttemperatur muss deshalb aus Korrosionsschutzgründen verhindert werden. Um die Energie des Abgases dennoch nutzen zu können müssen im weiteren Abgasweg korrosionsfeste Materialien eingesetzt werden. In der Praxis hat dies bei stärker schwefelhaltigen Brennstoffen jedoch aus wirtschaftlichen und umweltrechtlichen Gründen nur selten Relevanz.

In Anlagen, in denen Holz als Brennstoff eingesetzt wird, kann es bei unvollständigen Verbrennungsprozessen außerdem zum Auskondensieren von Harzen und Teeren kommen, die einen zähen Belag was zu einer Beeinträchtigung der Wärmeübertragung führt. Dementsprechend ist die Verbrennungsluftführung so zu steuern, dass zu jeder Zeit eine vollständige Verbrennung gewährleistet ist.

In vielen Feuerungsanlagen mit Normbrennstoffen wie Erdgas oder leichtem Heizöl ist es aber möglich, die Abgase so weit abzukühlen, dass es zu Kondensation von Abgasbestandteilen, vor allem Wasser, kommt. Dies erhöht noch zusätzlich die dem Abgas entziehbare Energie und wird als Brennwertnutzung bezeichnet. Für Anlagen mit einer Erdgas- bzw. Heizölfeuerung (schwefelarm) muss ab einer Feuerungswärmeleistung von 200 kW eine Neutralisationsanlage vorgesehen werden. Anlagen zur Verbrennung von schwefelhaltigem Heizöl sind ab 25 kW Feuerungswärmeleistung mit einer Neutralisationsanlage auszustatten.

Voraussetzung für eine optimale Ausnutzung des Brennwerteffektes sind geeignete Wärmesenken. Diese können Niedertemperaturheizsysteme, Brauchwasserbereitung oder Prozessvorwärmebedarfe auf einem Temperaturniveau unterhalb der Kondensationstemperatur sein. Werden höhere Temperaturniveaus benötigt, kann die Abgaswärme mit einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau angehoben werden.

#### *Verbrennungsluft- und Speisewasservorwärmung*

In der Praxis kann ein Luftvorwärmer die Effizienz von Heizkesseln um 3 bis 5 % steigern (Erhöhung feuerungstechnischer Wirkungsgrad bis 5 % (3 S. 18).

Da eine Verbrennungsluftvorwärmung zu einer Erhöhung der Flammentemperatur führt, wird dadurch die Bildung von thermischem  $\text{NO}_x$  begünstigt. Bei der Planung sind daher geeignete Maßnahmen zur Begrenzung dieser Emissionen vorzusehen.

Die möglichen Effizienzsteigerungen durch Speisewasservorwärmung mittels Economiser betragen zwischen 5 und 7 % (4 S. 11) (Economiser, Kapitel 3.2.4).

#### **A.1.3.2 Energetische Optimierung von Brennern**

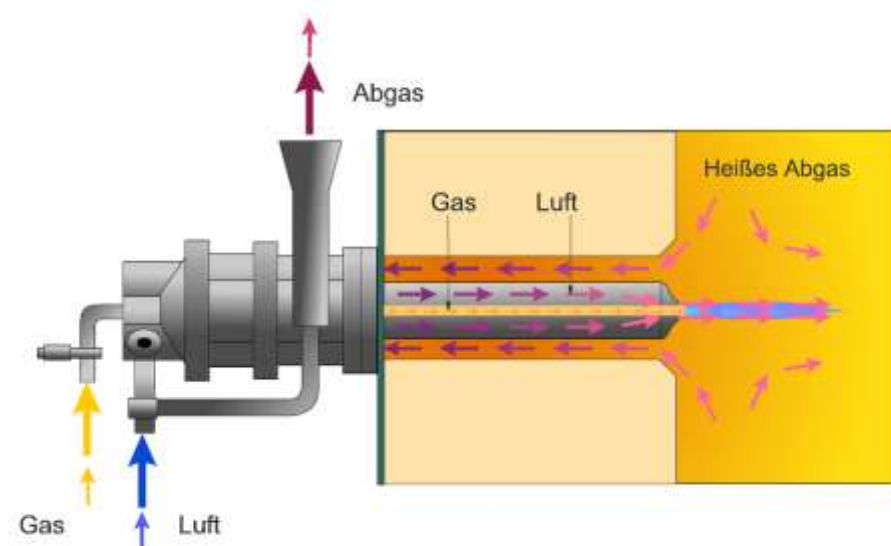
Ohne eine externe Wärmerückgewinnung erhöht sich mit steigender Prozesstemperatur auch der Anteil der Verluste über das Abgas. Da eine Luftvorwärmung nicht nur einen Teil der verfügbaren Abwärme nutzen kann, ist der Einsatz von rekuperativen und regenerativen Brennersystemen interessant. Diese besitzen eine integrierte Verbrennungsluftvorwärmung und erreichen damit höhere Temperaturen, was zu einer besseren Brennstoffausnutzung führt.

##### *Rekuperative Brenner*

In rekuperativen Brennern wird die Verbrennungsluft im Gegenstrom am heißen Abgas vorbeigeleitet. Da die Verbrennungsluftvorwärmung direkt nach der Verbrennung erfolgt, können deutlich höhere Temperaturen erreicht werden, was zu einer höheren Einsparung führt.

Abbildung A.1-3: Schema rekuperativer Brenner

---



Quelle: (5)

Beste verfügbare Technik sind Low- $\text{NO}_x$ -Brenner oder FLOX-Brenner, welche gleichzeitig die Bildung von thermischem  $\text{NO}_x$  vermeiden.

##### *Regenerative Brenner*

Bei regenerativen Brennern wird das heiße Abgas über einen Wärmespeicher (z. B. Stahl-, Keramik- oder Graphitkugeln) geleitet und gibt einen Teil der Wärme an diese Wärmespeichermaterialien ab. Danach wird die Verbrennungsluft über die aufgeheizten Wärmespeicher geführt, die die Wärme aufnimmt.

#### *Brenner mit Verbrennungsluft- und/oder Brennstoffstufung*

Alternativ zur Rauchgasrückführung kann auch ein Brenner mit gestufter Verbrennungsluft- und/oder Brennstoffzufuhr die Flammentemperatur begrenzen und die Bildung von  $\text{NO}_x$  vermeiden.

#### *Hochgeschwindigkeits- und Impulsbrenner*

Bei diesen Brennern wird die Bildung von  $\text{NO}_x$  vermieden indem das Sauerstoff-Brennstoff-Gemisch mit sehr hohen Geschwindigkeiten in den Brennraum eingebracht wird, wodurch sich automatisch eine Rezirkulation des Rauchgases ergibt.

#### *Flammenlose Oxidation (FLOX)*

Übersteigt die Temperatur des rezirkulierten Abgases die Selbstentzündungstemperatur des Brennstoff-Luft-Gemisches, erfolgt die Verbrennung gleichmäßig im gesamten Brennraum. Dabei entsteht keine Flammenfront in der sich das thermische  $\text{NO}_x$  bilden kann wodurch die  $\text{NO}_x$ -Bildung stark reduziert wird.

#### *Sauerstoffbrenner*

Luft besteht zu ca. 21 % aus Sauerstoff und zu 79 % aus Bestandteilen, die nicht an der Verbrennung teilnehmen. Luftstickstoff macht davon den größten Anteil aus. Bei der Verbrennung wird ein Teil der freigesetzten Energie darauf verwendet, dass diese 79 % der Verbrennungsluft mit aufgeheizt werden. Wird Sauerstoff anstelle von Luft als Oxidationsmittel verwendet, ergeben sich folgende Vorteile:

- ▶ Geringerer Brennstoffbedarf, da weniger Oxidationsmittel erwärmt werden muss;
- ▶ Kaum  $\text{NO}_x$ -Bildung, da kein Luftstickstoff in den Brennraum eingebracht wird;
- ▶ Geringeres Abgasvolumen und damit geringere Abgasverluste.

Nachteilig ist dabei, dass der Sauerstoff künstlich bereitgestellt werden muss, wodurch der Bedarf an Hilfsenergie steigt. Die daraus resultierenden Verbräuche sind in der Berechnung der Effizienzsteigerung zu berücksichtigen.

Tabelle A.1-2: Übersicht über Brenner für Industrieöfen

| Auswahlkriterium                  | Kaltluftbrenner | Sauerstoffbrenner | Rekuperativer Brenner | Regenerativer Brenner |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Kosten                            | Gering          | Hoch              | Mittel                | Hoch                  |
| Feuerungstechnischer Wirkungsgrad | 50-65 %         | 85-90 %           | 70- 85 %              | 80-90 %               |
| Verbrennungstemperaturen          | 1200 °C         | 2000 °C           | 1300 °C               | 1300 °C               |
| Abgastemperaturen                 | 600-1300 °C     | 600-1000 °C       | 400-980 °C            | 150-540 °C            |

#### **A.1.3.3 Optimierung des Luftüberschusses**

Um eine vollständige Verbrennung zu erreichen, muss mehr Sauerstoff als Oxidationsmittel eingebracht werden als rechnerisch erforderlich ist. Dieser Luftüberschuss erhöht die Abgasmenge. Um die Abgasverluste zu vermeiden, muss daher darauf geachtet werden, dass der Sauerstoffgehalt im Abgas gerade groß genug ist, um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten. Ein höherer Luftüberschuss senkt die Abgastemperatur vor der Nutzwärmeübertragung, was zu Wirkungsgradeinbußen führt.

Zu gering bemessene Luftmengen führen zu einer unvollständigen Verbrennung, woraus ebenfalls ein geringerer Wirkungsgrad resultiert. Zudem entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung zusätzliche unerwünschte Stoffe, beispielsweise gesundheitsschädliches Kohlenmonoxid.

Eine unvollständige Verbrennung kann durch den Einsatz einer Lambda-Sonde im Abgasstrom verhindert werden. Diese misst den Restsauerstoffgehalt. Alternativ kann eine Zirkoxid-Sonde eingesetzt werden, die neben Restsauerstoff auch unverbrannte Abgasbestandteile wie Wasserstoff und Kohlenmonoxid erfasst. Damit kann ein optimaler Luftüberschuss eingestellt und ein maximaler Wirkungsgrad in jedem Lastfall erreicht werden.

In Tabelle A.1-3 sind die maximal anzustrebenden Luftverhältnisse in Abhängigkeit des eingesetzten Brennstoffes aufgeführt.

Tabelle A.1-3: Vorschlag von Ökodesign- Mindestanforderungen an das Luftverhältnis bei Industrieöfen

| Brennstoff | Maximaler $\lambda$ -Wert |                    |
|------------|---------------------------|--------------------|
|            | 1. Stufe (ab 2016)        | 2. Stufe (ab 2019) |
| Erdgas     | 1,25                      | 1,15               |
| LPG        | 1,25                      | 1,15               |
| Heizöl     | noch zu bestimmen         | noch zu bestimmen  |

Quelle: (6 S. 22)

Dabei Ausnahmen bei

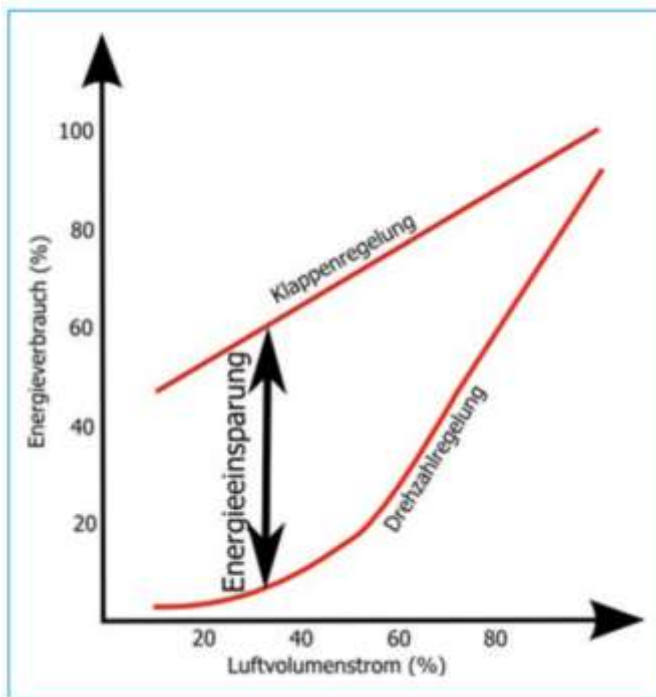
- ▶ elektrischen Feuerungen und Öfen,
- ▶ direkt befeuerten Feuerungen und Öfen,

wenn spezielle atmosphärische Bedingungen benötigt werden. Bestimmte Prozesse benötigen eine reduzierende Atmosphäre (z. B.  $\lambda = 0,95$ ), während andere Prozesse größere Mengen an Luft benötigen (z. B. Prozesse, bei denen Metalloberflächen oxidiert werden).

#### *Optimierung im Teillastbetrieb*

Durch drehzahlgeregelten (modulierenden) Betrieb von Gebläsebrennern können Heizkessel gezielt in Teillastbereiche gefahren werden und so effizienter auf Lastschwankungen reagieren. Dabei werden Verluste durch häufiges An- und Abschalten der Anlage vermieden (z. B. Durchlüftungsverluste, Kapitel 3.2.8). Weiterhin lassen sich bei Teillastbetrieb durch die Drehzahlregelung der Gebläse signifikante Einsparungen an elektrischer Hilfsenergie erreichen (Abbildung A.1-4). Bei durchschnittlicher Kesselauslastung können ca. 40 % der Stromkosten eingespart werden (7 S. 118).

Abbildung A.1-4: Schematische Darstellung der Einsparung an elektrischer Hilfsenergie durch Drehzahlregelung bei Gebläsebrennern



Quelle: (8 S. 252)

#### A.1.3.4 Wahl des Brennstoffes

Die Auswahl des Brennstoffes erfolgt in der Regel bei der Auslegung der Anlage. Auswahlkriterien können sein:

- ▶ Wirtschaftlichkeit (Kosten Beschaffung, Lagerung, Handling),
- ▶ Energieeffizienz der Verbrennung,
- ▶ Versorgungssicherheit/Unabhängigkeit,
- ▶ Umweltschutz, niedrige Schadstoffemissionen.

Brennstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung. Dies hat Auswirkungen auf ihren Energieinhalt, ausgedrückt durch den Heiz- bzw. Brennwert sowie die Schadstoffemissionen. Unterschieden werden kann weiterhin in gasförmige, flüssige und feste Brennstoffe. Gasförmige und flüssige Brennstoffe benötigen in der Regel einen Luftüberschuss von maximal 1,1. Feste Brennstoffe weisen einen höheren Luftbedarf für eine stabile Verbrennung auf. Weiteren Einfluss hat die Wahl des Brennstoffes beispielsweise auf die Möglichkeit zur Brennwertnutzung, da der Gesamtschwefelanteil im Brennstoff die Bildung von Schwefelsäure beeinflusst wodurch eine Brennwertnutzung erschwert wird oder unwirtschaftlich macht.

#### A.1.3.5 Reduzierung der Wärmeverluste

##### *Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmedämmung*

Bei der Verbrennung erwärmen sich die Wandungen des Feuerungsraumes und der rauchgasführenden Rohrleitungen. Diese geben die Wärme konvektiv und über Wärmestrahlung an die Umgebung ab. Durch den Einsatz von Wärmedämmung in diesen Bereichen können die unkontrollierten Wärmeverluste an die Umgebung verringert werden.

Bei der Installation ist darauf zu achten, dass alle relevanten Bauteile mit ausreichend Wärmedämmung versehen sind.

Werden an die Wärmedämmung aufgrund des Einsatzfeldes besondere Anforderungen gestellt, kann eine Kombination aus verschiedenen Dämmmaterialien erforderlich werden um Anforderungen an:

- ▶ Thermische,
- ▶ Chemische und
- ▶ Mechanische Belastbarkeit

zu erfüllen.

Da Wärmedämmung bei langjähriger Nutzung verschleifen kann, sollten Schwachstellen regelmäßig mit einer Wärmebildkamera detektiert und in Wartungsphasen aus- oder nachgebessert werden.

#### *Reduzierung der Verluste durch die Öffnungen von Industrieöfen*

Verluste durch Öffnungen von Industrieöfen ergeben sich beim Öffnen der Türen z. B. zum Be- und Entladen. Diese Verluste können minimiert werden durch:

- ▶ Reduzierung der Öffnungsgröße auf das erforderliche Minimum,
- ▶ Thermisch beständige Abdichtung der Öffnungen,
- ▶ Den Einsatz von Einbringhilfen mit geringer thermischer Speichermasse,
- ▶ Minimierung der Einbringhilfe auf ein Minimum,
- ▶ Den Einsatz von Schleusensystemen,
- ▶ Zuführung von einzubringenden Anlagenkomponenten und Nutzgütern von einer kalten Seite.

#### **A.1.4 Angaben zur Energieeffizienz von Feuerungsanlagen im Rahmen eines Antragsverfahrens**

Entsprechend zahlreicher immissionsschutzrechtlicher und teilweise auch baurechtlicher Vorschriften zu Feuerungsanlagen sind sowohl Kriterien für die Energieeffizienz von Feuerungsanlagen (z. B. maximal zulässige Abgasverluste) als auch bestimmte Informationen zur Ausrüstung und Betriebsführung bereits vorgegeben.

Für beste verfügbare Technik, die über diese Vorgaben hinaus zu einer weiteren Erhöhung der Energieeffizienz einer Feuerungsanlage führen kann, ist zunächst die Anwendbarkeit

- ▶ bestimmter Teile des LCB-BREF und/oder
- ▶ eines ggf. technologisch zutreffenden vertikalen BREF

zu prüfen. Für einen abschließenden Prüfschritt bietet die nachfolgende Tabelle eine Übersicht der wichtigsten Merkmale bzw. wirtschaftlich sinnvollen Maßnahmen, mit denen eine möglichst hohe Effizienz erreicht werden kann. Es ist zu betonen, dass nicht alle Prüfpunkte gleichzeitig an einer individuellen Anlage sinnvoll umsetzbar sind. Vielmehr ist die Tabelle als Checkliste zu verstehen, um zumindest die mögliche Relevanz für den konkreten Anwendungsfall strukturiert prüfen zu können.

Tabelle A.1-4: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von Feuerungsanlagen

| Kapitel | Technik/Maßnahme                | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Anwendbarkeit                                                                                 |
|---------|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3.1.1   | Reduzierung der Abgastemperatur | Dimensionierung der Feuerungsanlage für maximale Last unter Einbezug eines sorgfältig bestimmten Sicherheitsfaktors für Überlast<br><br>Effizienz der Wärmeauskopplung sicherstellen durch Optimierung der Wärmeübertragergeometrie (Planungsaufgabe) sowie regelmäßige Reinigung der Wärmeübertragerflächen (Aufgabe Betriebsführung);<br>Ggf. Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten durch | Alle Feuerungsanlagen<br><br>Bei indirekter Wärmenutzung mittels Wärmeübertrager (Heizkessel) |

| Kapitel | Technik/Maßnahme                                               | Beschreibung                                                                                                        | Anwendbarkeit                                                                                                     |
|---------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |                                                                | Turbulatoren                                                                                                        |                                                                                                                   |
|         |                                                                | Erhöhung des Wärmeübergangs auf das Gut durch Optimierung der Strömungsführung und geeignete Brennerwahl            | Thermoprozessanlagen (siehe auch 3.1.2)                                                                           |
|         |                                                                | Wärmerückgewinnung zur Luftvorwärmung (intern und extern)                                                           | Alle Feuerungsanlagen (siehe auch 3.1.2)                                                                          |
|         |                                                                | Wärmerückgewinnung zur Speisewasservorwärmung                                                                       | Dampferzeugung und Heizwasserbereitstellung                                                                       |
|         |                                                                | Wärmerückgewinnung aus dem Abgas zur Trocknung oder Erwärmung von Brenn-, Roh- und Hilfsstoffen                     | Alle Feuerungsanlagen                                                                                             |
|         |                                                                | Wärmerückgewinnung zur betriebsinternen Nutzung oder externen Wärmenutzung                                          | Alle Feuerungsanlagen                                                                                             |
|         |                                                                | Brennwerttechnik                                                                                                    | Brennstoffabhängig. Vorhandensein von Niedertemperatur-Wärmesenke notwendig, ggf. abwassertechnischer Mehraufwand |
| 3.1.2   | Energetische Optimierung von Brennern für Industrieöfen        | In den Brenner integrierte Luftvorwärmung (regenerative und rekuperative Brenner) sowie Sauerstoffbrenner (Oxyfuel) | Thermoprozessanlagen, typisch für Prozesse mit hohen erforderlichen Temperaturen                                  |
| 3.1.3   | Optimierung des Luftüberschusses                               | Minimierung des Luftüberschusses (Reduktion von Abgasverlusten)                                                     | Alle Feuerungsanlagen, notwendiger Luftüberschuss abhängig von Brennstoff und Prozessführung                      |
|         |                                                                | Drehzahlgeregeltes Brennergebläse                                                                                   | Bei Feuerungsanlagen mit Gebläsebrennern                                                                          |
| 3.1.4   | Wahl des Brennstoffes                                          | Energieeffizienz der Verbrennung (minimal notwendiger Luftüberschuss), Eignung für Brennwertnutzung                 | Abhängig von Standort und Prozess                                                                                 |
| 3.1.5   | Reduzierung der Wärmeverluste durch Wärmedämmung               | Minimierung der Wärmeverluste an die Umgebung durch Konvektion, Wärmeleitung- und Strahlung                         | Alle Feuerungsanlagen                                                                                             |
| 3.1.6   | Reduzierung der Verluste durch die Öffnungen von Industrieöfen | Minimierung der Verluste durch Be- und Entladen, Schauöffnungen, etc.                                               | Thermoprozessanlagen                                                                                              |

Stand der Technik zumindest bei größeren Feuerungsanlagen ist außerdem eine kontinuierliche Daten- und Zustandserfassung der wesentlichen Systemkomponenten und deren Visualisierung für das Betriebspersonal. Somit können Fehler und Abweichungen von Betriebsparametern schneller und besser identifiziert werden. Langfristig ist mit diesem Daten- und Informationsaustausch eine bedarfsabhängige Wartung möglich.



## A.2 Dampfsysteme

### A.2.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Dampfsysteme

#### A.2.1.1 Anwendungsbereich von Dampfsystemen und einsatzbestimmende Eigenschaften

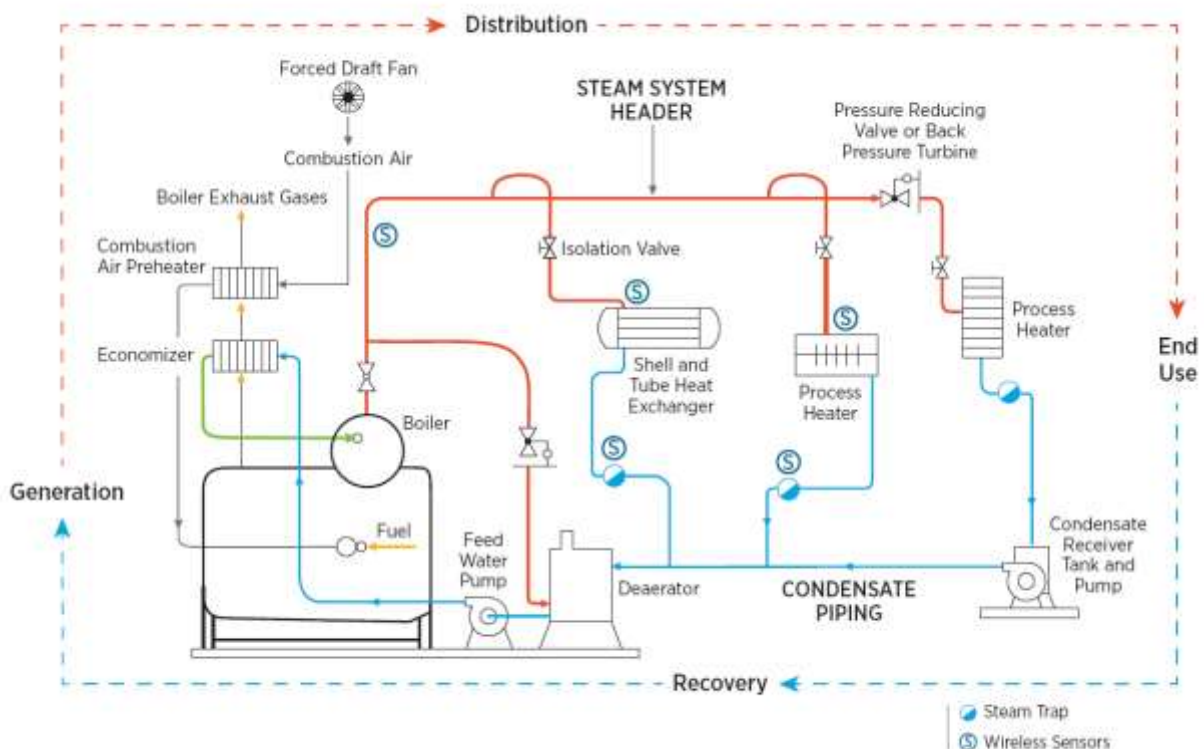
Als Dampfsysteme werden Energiesysteme betrachtet, in denen Wasser zirkuliert und dabei zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand wechselt. Die Phasenumwandlung in Dampf bietet einerseits den Vorteil, ein expansions- und damit arbeitsfähiges Gas zur Verfügung zu bekommen und bei dieser sogenannten Dampferzeugung hohe Energiestromdichten aufzuweisen. Andererseits ermöglicht die Kondensation des Dampfes die Wärmeabgabe bei weitgehend konstanter Temperatur.

Dampfsysteme finden beispielsweise in folgenden Sektoren Anwendung:

- ▶ Energieerzeugung,
- ▶ alle Sektoren der chemischen Industrie,
- ▶ Zellstoff-/Papierindustrie,
- ▶ Lebensmittelindustrie.

Dampfsysteme lassen sich in folgende Bereiche unterteilen, siehe nachfolgende Abbildung A.2-1:

Abbildung A.2-1: Typisches Dampfsystem mit Erzeugung, Verteilung, Nutzung und Rückgewinnung



Quelle (9 S. 3)

#### Erzeugung

- ▶ Übertragung der Wärme aus Rauchgasen oder elektrischen Heizungen auf aufbereitetes Speisewasser,
- ▶ Phasenwechsel des Wassers bei ausreichender Wärmeaufnahme,
- ▶ Anschließend teilweise weitere Energiezufuhr (Überhitzung des Dampfes),
- ▶ Übergabe an das Verteilsystem.



### *Verteilung*

- ▶ Dampf wird über das Dampfnetz bei unterschiedlichen Drücken und Temperaturniveaus der Endanwendung zugeführt.
- ▶ Im Dampfnetz sind Armaturen, wie Absperr- und Drosselventile, Kondensatableiter sowie teilweise Gegendruckturbinen, integriert.

### *Endanwendung*

- ▶ Anwendung als Wärmeträger für industrielle Prozesse aufgrund des durch Kondensation erschließbaren hohen spezifischen Energieinhaltes sowie der konstanten Temperatur bei Kondensation des Wasserdampfes. **Prozessnotwendige Temperaturen bedingen dabei die Zustandsparameter des bereitzustellenden Dampfes (Druck, Temperatur, Feuchte) und bilden damit die wesentlichste Basisgröße.**
- ▶ Ausnutzung der Expansions- und damit Arbeitsfähigkeit des Wasserdampfes zur Bereitstellung mechanischer Antriebsenergie (z. B. Antrieb von Pumpen, Generatoren).
- ▶ Wasserdampf als Träger chemischer Substanzen (z. B. als Moderator) in der chemischen Industrie (z. B. Wasserdampfdestillation) oder als Wasser- bzw. Wasserstoffquelle.
- ▶ Typische Komponenten sind dementsprechend Wärmeübertrager, Turbinen, Fraktionierkolonnen, Dampfstripper und chemische Reaktionsbehälter.

### *Rückgewinnung*

- ▶ Nicht Bestandteil des Dampfsystems, wenn Dampf für chemische Reaktionen benötigt wird und im Prozess/Endprodukt verbleibt.
- ▶ Sammlung und Rückführung von flüssigem Wasser (Kondensat) im Kondensatnetz mittels Pumpen.
- ▶ Zuführung des Kondensats zur Speisewasseraufbereitung, wobei eine thermische Entfernung von Sauerstoff und anderen Gasen (Entgasung) sowie eine chemische Aufbereitung erfolgt (Entsalzung, Konditionierung).
- ▶ Rückgewinnung des Entspannungsdampfes aus Hochdruckkondensat, aus der Absalzung und Abschlammung des Kessels sowie aus der Entgasung (Brüdenkondensator).

### *Relevante Besonderheiten von Dampfsystemen*

- ▶ Hohe Drücke und Druckdifferenzen,
- ▶ hohe Temperaturen und Temperaturdifferenzen,
- ▶ Verdampfungsvorgänge, bei denen sich Salze absondern,
- ▶ Verknüpfung mit Verbrennungsprozessen – Dampferzeugung als Wärmeabfuhr aus Verbrennungsprozessen,
- ▶ umfangreiche Rohrleitungssysteme,
- ▶ umfangreiche Wärmeübertragungssysteme,
- ▶ Integration von Dampfturbinen.

Alternativen zum Einsatz von Dampf als Energieträger sind Wasser (unter Druck, der über dem Siededruck der erforderlichen Prozesstemperatur liegt) und organische Arbeitsmittel („Thermalöle“). Beide Flüssigkeiten haben im Vergleich zu Dampfanwendungen bei Wärmeübertragungsprozessen den Nachteil geringerer Wärmeübergangskoeffizienten und erlauben keine Wärmeabgabe bei konstanten Temperaturen, die hier kein Phasenwechsel (gasförmig – flüssig) ausgenutzt werden kann.

### **A.2.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Dampfsystemen im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes**

#### **A.2.1.2.1 Bagatellschwellenprüfung**

Eine Bagatellschwellenprüfung kann durch die Beantwortung folgender Fragen relativ einfach erfolgen:

- ▶ Fungiert Dampf als Wärmeträgermedium oder expansionsfähiges Gas für den technologischen Prozess oder wird dieser direkt für chemische Reaktionen benötigt? → **weiterführende Berücksichtigung im Antragsverfahren (weiter mit Kapitel A.2.1.2.2).**
- ▶ Wird Dampf diskontinuierlich und nur in geringer Menge eingesetzt, punktuell elektrisch erzeugt und nicht über ein Verteilnetz transportiert? (Beispiel: Laborautoklaven, mobile Dampferzeuger für Reinigungszwecke, Befeuchtungsaggregate in RLT-Anlagen) → **Bagatellfall, keine weitere Betrachtung.**

#### **A.2.1.2.2 Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes im Antragsverfahren**

Nachfolgend sind typische Beispiele aufgelistet, deren Prüfgegenstände abgegrenzt und Verweise auf bewertungsrelevante Dokumente gegeben:

1. In einer Anlage wird Dampf benötigt und selbst erzeugt (Beispiel: Industrieanlage mit integrierter Erzeugungsanlage): Prüfgegenstand ist die Gesamtanlage.
2. In einer Anlage wird Dampf benötigt und über eine (genehmigungsrechtlich) externe Anlage bezogen (Beispiel: Industrieanlage in Industriepark mit übergeordneter Medienversorgung): Prüfgegenstand sind alle Dampfanlagen im Verantwortungsbereich des Antragstellers (i. W. Endanwendung und Verteilung).
3. In einer Anlage wird Dampf zur Abgabe an (genehmigungsrechtlich) externe Anlagen erzeugt (Beispiel: Energieerzeugungsanlage in einem Industriepark): Prüfgegenstand: Dampfanlagen im Verantwortungsbereich des Antragstellers (i. W. Erzeugung, Rückgewinnung, z. T. Verteilung).
4. In einer Anlage wird Dampf zur Stromerzeugung benötigt, der Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist (Beispiel: Energieerzeugungsanlage):
  - Prüfgegenstand: Gesamtanlage,
  - Es gilt ein eigenständiges BVT-Merkblatt [LCP BREF] (1). Das vorliegende Dokument kann ergänzend für eine Bewertung herangezogen werden.
5. In einer Anlage wird Abfall thermisch entsorgt, wobei gekoppelt Dampf erzeugt wird, der Dampf wird intern genutzt und/oder an (genehmigungsrechtlich) externe Anlagen abgegeben (Abfallbeseitigungsanlage mit gekoppelter Dampferzeugung):
  - Prüfgegenstand: Gesamtanlage oder Dampfanlagen im Verantwortungsbereich des Antragstellers (i. W. Erzeugung, Rückgewinnung, z. T. Verteilung),
  - Es gilt ein eigenständiges BVT-Merkblatt Abfallverbrennung; das vorliegende Dokument kann ergänzend für eine Bewertung herangezogen werden.

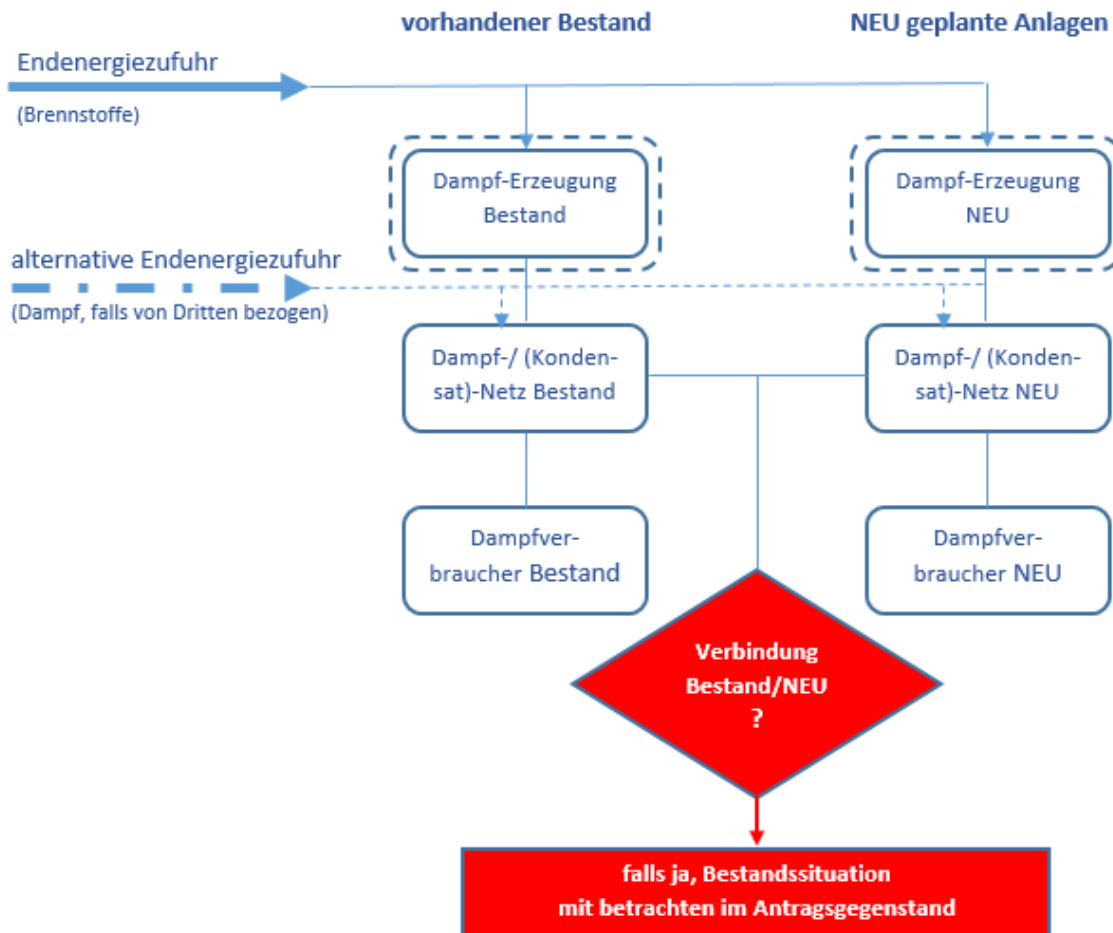
Je nach Verbrennungstechnologie existieren Überschneidungen mit der Vollzugshilfe „Feuerungsanlagen“.

Ausgehend von dieser Eingrenzung des Betrachtungsrahmens sind folgende Fragen zu beantworten:

- ▶ Welche wesentlichen Dampfverbraucher sind im Antragsgegenstand enthalten?
- ▶ Welche Dampferzeugungsanlagen sind im Antragsgegenstand enthalten?
- ▶ Sind Bestandsanlagen zur Dampferzeugung vorhanden?
- ▶ Sollen mit neuen Dampferzeugungsanlagen Verbraucher im Bestand versorgt werden?

Anhand des Prinzipschemas gemäß Abbildung A.2-2 soll der Prüfgegenstand im Antragsverfahren gekennzeichnet werden. Die vorgelagerte Bagatellbetrachtung ist in diesem Prüfschema nicht dargestellt.

Abbildung A.2-2: Schema zur Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes Dampfsystem im Antragsverfahren



Quelle: eigene Abbildung, GICON, 2018

#### A.2.1.2.3 Systembetrachtung

Dampfsysteme sind komplexe Anlagen, deren Gesamteffizienz nur im Zusammenwirken der vier ineinander greifenden, funktionalen Teilsysteme (Erzeugung, Verteilung, Endanwendung, Rückgewinnung) betrachtet werden kann. Methodisch ist es sinnvoll, die Systembetrachtung ausgehend vom Bedarf/der Verbraucherebene vorzunehmen und die hieraus die Anforderungen an die Übertragungs- und Erzeugungssysteme sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht abzuleiten und zu bewerten. Dementsprechend erfolgt im Kapitel A.2.2 eine rückwärtsgerichtete Betrachtung von der Endanwendung/den Verbrauchern zu der Erzeugeranlage.

#### A.2.2 Angaben zum Dampfsystem im Rahmen eines Antragsverfahrens

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen verfügt der Vorhabenträger häufig noch nicht über Detaildaten zur Auslegung und den Medienverbräuchen einzelner Geräte und Anlagen oder der konkreten Ausgestaltung und Dimensionierung von Erzeugungs- und Verteilsystemen. In der Regel werden von den Vorhabenträgern Detailplanungen und Bestellvorgänge, in deren Rahmen solche Daten rechnerisch ermittelt oder von Lieferanten verbindlich angegeben werden, erst nach

Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sollten diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabenträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar sein. Nachfolgend sind wesentliche Angaben beschrieben, die zur Beurteilung der Energieeffizienz von Dampfsystemen geeignet sind. Sinnvollerweise ergeben sich diese Angaben aus **Verfahrensfließbildern**, die das gesamte Dampfsystem inklusive der Erzeugungsanlage (falls Prüfgegenstand) darstellen:

- ▶ Bezeichnung der (Haupt)-Verbraucher,
- ▶ Dampfparameter in der Anwendungsebene (Druck, Temperatur, Feuchte),
- ▶ quantitativer Bedarf in der Anwendungsebene bzw. beim Verbraucher in kg/h (maximal/durchschnittlich bzw. Einsatzhäufigkeit),
- ▶ Kennzeichnung, ob Kondensat rückgeführt wird oder nicht,
- ▶ Rohrleitungsdimensionierung mit Angabe max. Durchflussraten und den zugehörigen Dampfparametern,
- ▶ Angaben zur Wärmedämmung der Rohrleitungen,
- ▶ Auslegungsparameter von Gegendruckturbinen zur Druckreduktion bei Netzen mit konstant hohen Dampfmassenströmen und großen Druckdifferenzen,
- ▶ Prinzipdarstellung der Verschaltung von Kondensat-/Abgas- und ggf. anderen Prozessströmen zur Minimierung von Wärmeverlusten und einer effektiven Nutzung vorhandener Abwärmepotenziale aus Abgas, Kondensat, Entspannungsdampf, Abschlammwasser oder anderen Quellen im Produktionsprozess,
- ▶ Angabe von Medientemperaturen (Verbrennungsluft, Abgas, Dampf, Kondensat, Speisewasser, Frischwasser, sonstige Prozessabwärmeströme) für den Auslegungsfall.

Aus den Antrags- und/oder Planungsunterlagen sollte hervorgehen, ob Alternativen zu Dampfanwendungen bestehen und inwieweit diese im Hinblick auf energetische und betriebswirtschaftliche Fragestellungen abgewogen wurden.

Wesentliche Auslegungsgrundsätze energieeffiziente Dampfsysteme lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Reduzierung des erforderlichen Nutzenergiebedarfs (Dampfbedarfes) durch Effizienzmaßnahmen auf Verbraucherseite (Wärmerückgewinnung, Wärmedämmung)
- ▶ Reduzierung von Anlagenverlusten z. B:
  - Verminderung der Wärmeabgabe an die Umgebung durch effiziente Wärmedämmung und funktionssichere Kondensatableiter,
  - Nutzung von Druckunterschieden für die Gewinnung von mechanischer Antriebsenergie,
  - Nutzung großer Temperaturunterschiede für mehrfach gestufte Wärmeübertragung, um Rauchgas stärker auszukühlen und Brennstoff einzusparen,
  - Minimierung ungenutzter Entnahme von Arbeitsmedium aus dem System oder aus höheren Energieniveaus innerhalb des Systems für periodisch auszuführende Maßnahmen, die der Aufrechterhaltung der Funktionssicherheit dienen.
    - i. Absalzung
    - ii. Abschlammung
    - iii. Durchlüftung

c) Maßnahmen zur Abwärmenutzung

Die größten Potenziale für die Senkung unnötiger Wärmeverluste und damit für die Steigerung der Energieeffizienz liegen **in der optimalen Ausnutzung der thermischen Energie von**

**Verbrennungsabgasen der Kesselanlage** durch Einsatz von Abgaswärmetauschern („Economizer“, Brennwärmetauscher). Nach (10 S. 11) sind für typische Effizienzmaßnahmen folgende Brennstoffeinsparpotenziale möglich:

- ▶ Economiser: bis zu 7 %,
- ▶ Brennwärmetauscher: bis zu 5 %,
- ▶ Hochdruckkondensatsystem: bis zu 12 %,
- ▶ Laugenentspanner und Wärmerückgewinnung: bis zu 2 %,
- ▶ Brüdenwärmetauscher: bis zu 0,5 %,
- ▶ automatisierte und kontinuierliche Wasseranalytik: bis zu 0,5 %.

Wesentliche Techniken und Maßnahmen zur Verwirklichung dieser Grundsätze werden im nachfolgenden Abschnitt detaillierter beschrieben.

#### **A.2.2.1 Wesentliche Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz**

##### **A.2.2.2 Dampfverbraucher**

Für die Dampfverbraucher gilt in erste Linie die Zielstellung, einen möglichst niedrigen Energiebedarf zu realisieren, der möglichst nahe am thermodynamischen Optimum liegt. Im Wesentlichen ist dies durch eine optimale Verschaltung von Prozessströmen (Wärmerückgewinnung, siehe hierzu auch Beschreibung in der Vollzugshilfe „Abwärmenutzung“) und eine hocheffiziente Wärmedämmung von Apparaten und Anlagen zu erreichen.

##### **A.2.2.3 Dampfverteilung**

In nachfolgender Tabelle A.2-1 sind wesentliche Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Dampfverteilung dargestellt und im Anschluss textlich erläutert:

Tabelle A.2-1: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Dampfverteilung

| Technik/Maßnahme                                                 | Beschreibung                                                                                                          | Anwendbarkeit                                  |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Energetische Optimierung der Dampfverteilungssysteme             | Sorgfältige Dimensionierung und Wartung des Dampf- und Kondensatsystems                                               | Alle Dampfsysteme                              |
| Einsatz von Gegendruckturbinen                                   | Anstelle von Drosselventilen Einsatz von Gegendruckturbinen zur Bereitstellung mechanischer bzw. elektrischer Energie | Bei Neuanlagen oder umfassender Modernisierung |
| Wärmedämmung von Dampfröhrleitungen und Kondensat-Rücklaufrohren | Umfassende Installation und Wartung von Wärmedämmung aller wärmeleitenden Komponenten des Dampf- und Kondensatsystems | Alle Dampfsysteme                              |
| Systematische Überwachung und Wartung von Kondensatableitern     | Prüfung und Überwachung von Kondensatableitern, um Energieverluste und/oder Schädigungen am Dampfsystem zu vermeiden  | Alle Dampfsysteme                              |

Quelle: eigene Darstellung, GICON, 2018

#### **Dimensionierung**

Eine fachgerechte Planung/Dimensionierung des Dampf- und Kondensatsystems ist Voraussetzung für einen energieeffizienten Betrieb eines Dampfsystems. Für die Leitungsverlegung sollten folgende Grundsätze beachtet werden:

- ▶ Neigung der Leitung in Strömungsrichtung, um den Kondensatabfluss zu gewährleisten (1:100 – 1:200),
- ▶ Vorsehen von Kompensationsmöglichkeiten von Längenänderungen (vor allem bei Inbetriebnahme/Anfahren der Anlage und der Außerbetriebnahme) inkl. notwendigen Fest- und Loslagern,
- ▶ Vorsehen von Entwässerungsstellen (Kondensatableitern) in Dampfleitungen (Sattdampfleitungen ca. alle 25 m Rohrleitung), an Tiefpunkten und Leitungsenden,
- ▶ Vorsehen von ausreichenden Entlüftungsstellen an Dampfleitungen,
- ▶ Einsatz von Kondensatableitern mit guten Entlüftungseigenschaften.

Bei der Dimensionierung der Dampfleitungen ist auf ausreichende Rohrdurchmesser zu achten. Bei zu geringen Durchmessern führt die dadurch entstehende hohe Strömungsgeschwindigkeit zu Druck- und damit Energieverlusten. Weiterhin steigen die Erosion, die Gefahr von Wasserschlägen und Beschädigungen von Armaturen durch mitgerissene Wassertropfen. Ein zu geringer Durchmesser erhöht die Geräuschemission durch die Strömung. Sattdampfleitungen werden typischerweise für eine Strömungsgeschwindigkeit von ca. 25 m/s, Heißdampfleitungen für ca. 40 m/s und Kondensatableitungen für 1 - 3 m/s ausgelegt. Aufgrund des Entstehens von Nachdampf müssen Kondensatableitungen ebenfalls sorgfältig dimensioniert werden. Andernfalls entsteht durch das Nachdampfvolumen ein höherer Gegendruck, was wiederum zu negativen Auswirkungen auf die Kondensatableitung führt. Damit steigt ebenfalls die Gefahr von Wasserschlägen. Die für einen zuverlässigen Betrieb notwendige Kondensatableitung ist sowohl für den Normalbetrieb als auch für die Inbetriebnahme ausreichend zu dimensionieren, da es bei Dampfströmung durch kalte Rohrleitungen zu einem wesentlich höheren Kondensatanfall kommt. Armaturen sind auf ihre Eignung für den jeweiligen Einsatz zu überprüfen, angemessen zu dimensionieren und korrekt zu installieren. Weiterer Bestandteil einer energieoptimierten Anlagengestaltung sollte eine vollständige und effiziente Wärmedämmung aller Rohrleitungen, Armaturen und bestimmten Typen von Kondensatableitern sein (siehe Ausführungen weiter unten).

### **Einsatz von Gegendruckturbinen**

Mit Drosselgeräten (hauptsächlich Ventilen) erfolgt eine isenthalpe Druckreduktion (Enthalpie bleibt während des Vorganges konstant). Gleichzeitig kommt es bei der Entspannung zu einem Anstieg der Entropie, d. h. die Arbeitsfähigkeit (Exergie) des Fluids wird verringert. Damit ist das Fluid in geringerem Maße in der Lage, mechanische Arbeit zu verrichten (z. B. in einer Expansionsturbine). Bei großen Druckdifferenzen und hohen Dampfmasseströmen kann es unter Umständen energetisch (und betriebswirtschaftlich) sinnvoller sein, Gegendruckturbinen anstelle von Drosselventilen einzusetzen. Damit kann mechanische Energie für den Betrieb von einem Motor, Kompressor oder Ventilator gewonnen werden oder eine anschließende Umwandlung in elektrische Energie erfolgen.

Drosselventile werden in Dampfsystemen auch verwendet, um den Dampfdruck am Turbineneintritt zu steuern und zu reduzieren (Drosselregelung). Dem gegenüber steht die sog. Gleitdruckregelung, bei der der Druck im Dampferzeuger durch die Regulierung der Speisewasserpumpenleistung erfolgt. Durch den Teillastbetrieb der Speisewasserpumpe kann die Gleitdruckregelung energetisch günstiger sein als die Drosselregelung (11 S. 8).

Der Einsatz von Gegendruckturbinen kann ab einem Betriebsdruck von > 10 bar, einem Differenzdruck von > 7 bar und einem Dampfmassestrom von > 1,4 t/h in Erwägung gezogen werden (12 S. 1).

Anwendbar in neuen oder bedeutend modernisierten Systemen. Bei Anlagenplanung kann erwogen werden, einen Kessel mit höherem Druckniveau anzuschaffen und eine Entspannung auf das im Dampfsystem benötigte Druckniveau mittels einer Gegendruckturbine zur Stromerzeugung vorzunehmen. Bei nahe beieinanderliegenden Druckniveaus ist der Einsatz einer Gegendruckturbine



nicht funktional. Weiterhin wird ein möglichst hoher Dampfmassestrom mit hoher Verfügbarkeit benötigt sowie ausreichend Abnehmer von Niederdruckdampf. Die Gleitdruckregelung kann in Wasserrohrkesseln mit Zwangsdurchlauf eingesetzt werden.

### **Wärmedämmung von Dampfrohrleitungen und Kondensat-Rücklaufrohren**

Durch Wärmedämmung von heißen Oberflächen des Dampfsystems lassen sich Wärmeverluste an die Umgebung erheblich reduzieren. Dadurch lässt sich die Energieeffizienz des Systems steigern (es steht mehr Dampf für die Endanwendung zur Verfügung bei gleichem Brennstoffmassestrom) und es werden instabile Betriebszustände aufgrund von zu starker Kondensation in Dampfleitungen verhindert. Weiterhin dient die Dämmung der Betriebssicherheit, da die Verletzungsgefahr bei Berührung der heißen Oberflächen reduziert wird.

Die Wärmeverluste sollten unter Beachtung gültiger Standards und Richtlinien  $\leq 100 \text{ W/m}^2$  Oberfläche betragen (7 S. 203). Für gut gedämmte Dampfleitungen betragen die Oberflächenverluste ca. 40 - 60 W/m, für gut gedämmte Kondensatleitungen ca. 20 - 35 W/m (10 S. 32). Wärmeverluste nicht gedämmter Oberflächen liegen im Vergleich 10 bis 20fach höher. Die Oberflächen der Wärmedämmung sollten grundsätzlich nicht höher als 15 - 20 K über der Umgebungstemperatur liegen (7 S. 203), (10 S. 26).

Für Armaturen bzw. für unregelmäßige Komponenten des Systems im Allgemeinen können wiederverwendbare Dämmbeläge und -formteile eingesetzt werden.

### **Systematische Überwachung und Wartung/Instandsetzung von Kondensatableitern**

Sowohl beim eigentlichen Wärmeübertragungsprozess beim Endverbraucher als auch beim Durchströmen von Rohrleitungen kondensiert Dampf zu Wasser („Kondensat“) aus. Die Menge ausfallenden Kondensates im Leitungsnetz ist stark abhängig von der vom Temperatur- und Druckniveau (der Überhitzung) des Dampfes und liegt bei gut gedämmten Leitungen während der Inbetriebnahme je nach Betriebsparameter ca. 1,3 - 1,5fach höher (kleine Nennweiten) bzw. 8 - 10fach höher (größere Nennweiten) als während des Dauerbetriebs (13 S. 1). Die Trennung von Dampf und Kondensat, die Ableitung des Kondensates sowie die Entlüftung der Rohrleitung erfolgt mittels Kondensatableiter. Durch **Fehlfunktionen und Verschmutzungen von Kondensatableitern** kann es zu **erheblichen Energieverlusten** (Durchblasen von Dampf) sowie Schädigungen am Dampfsystem kommen (Entstehung von Druckstößen und Erosion der Dampfleitungen).

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Typen von Kondensatableitern für verschiedene Einsatzgebiete und mit unterschiedlichen Funktionsweisen sowie zu beachtenden Spezifikationen, die an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden können. Eine gute Übersicht hierzu gibt z. B. (13).

Für jedes Dampfsystem wird deshalb ein **systematisches Wartungsprogramm benötigt**, um nicht funktionstüchtige Kondensatableiter im Betrieb rechtzeitig identifizieren und schnellstmöglich Instand- oder ersetzen zu können. Neben den Kondensatableitern sollten auch damit verbundene Bypass-, Absperr- und Rückschlagventile geprüft werden.

Ein Wartungssystem für Kondensatableiter sollte folgende Punkte beinhalten (10 S. 41):

- ▶ Ausbildung und Erfahrung des zuständigen Personals,
- ▶ Aufnahme jedes Kondensatableiters (in einer Tabelle oder Datenbank),
- ▶ Begehung, Beurteilung des Zustandes nach Funktionsweise (in Ordnung/nicht in Ordnung) und Prüfung des Typs, der Größe sowie der korrekten Installation,
- ▶ Regelmäßige Beurteilung des Zustandes in Abhängigkeit des Druckniveaus:
  - >10 bar: etwa monatliche Überprüfung,
  - 2-10 bar: etwa vierteljährliche Überprüfung,
  - <2 bar: jährliche Überprüfung.

Automatisierte Überwachungssysteme können für jedem Kondensatableitertyp verwendet werden. Besonders sinnvoll ist deren Einsatz bei Ableitern mit hohen Betriebsdrücken und dementsprechend hohen Verlusten bei Leckagen sowie Ableitern, deren Fehlfunktion (Blockade) zu Schäden an der Anlage und Produktionsausfällen führen kann. Auch bei besonders komplexen Dampfsystemen kann der Einsatz automatisierter Überwachungssysteme mit zentraler Datenerfassung sinnvoll sein.

#### A.2.2.4 Rückgewinnung

In nachfolgender Tabelle A.2-2 sind wesentliche Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Rückgewinnung dargestellt und im Anschluss textlich erläutert:

Tabelle A.2-2: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Rückgewinnung

| Technik/Maßnahme                                                         | Beschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Anwendbarkeit                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung | Sammlung und Rückführung der größtmöglichen Menge an Kondensat. Sicherstellen der ordnungsgemäßen Funktion von Kondensatleitungen, Kondensatableitern und Wärmedämmung. Trennung in saubere und möglicherweise kontaminierte Kondensatströme. Evtl. automatische Überwachung von möglicherweise kontaminierten Kondensatströmen. | Nicht anwendbar, wenn der Dampf im Prozess verbleibt                                                                  |
| Wiederverwendung von Entspannungsampf                                    | Einsatz eines Kondensatentspanners, Anwendung für Speisewasseraufbereitung, Niederdruckwärmeübertrager, Luftvorwärmung oder Kombination mit Thermoverdichter                                                                                                                                                                     | Aus Kondensat und Absatzung/Abschlammung. Ohne Thermoverdichter Niederdrucknetz und ausreichend Verbraucher notwendig |

Quelle: eigene Darstellung, GICON, 2018

#### Sammeln und Rückführung von Kondensat an den Kessel zur Wiederverwendung

Ziel jeder Dampfanwendung sollte es sein, einen möglichst hohen Anteil an Kondensat zur Erzeugeranlage zurückzuführen, da dieses noch über einen beträchtlichen Energieinhalt verfügt und eine hohe Reinheit aufweist. Neben einer Senkung des Brennstoffbedarfes im Vergleich zu einem Betrieb ohne Rückgewinnung des Energieinhaltes des Kondensats stellen sich die geringeren Bedarfe an Zusatzspeisewasser und Chemikalien und ein geringer Aufwand für die externe Wasseraufbereitung sehr vorteilhaft dar. Diese Maßnahme ist jedoch nicht anwendbar, falls der erzeugte Dampf direkt für den Prozess verwendet und dort z. B. im Produkt verbleibt. Weiterhin sind Kontaminationen des Kondensats zu beachten. Bei der Auslegung von Anlagen ist es Praxis, die Kondensate in saubere und möglicherweise kontaminierte Kondensatströme zu trennen. Saubere Kondensate stammen aus Anlagenkomponenten, bei denen der Dampfdruck größer als der Prozessdruck ist, wodurch bei Leckagen keine Kontamination erfolgen kann. Diese Kondensate können ohne weitere Maßnahmen verwendet werden. Ist der Dampfdruck niedriger als der Prozessdruck, besteht bei Leckagen die Möglichkeit einer Kontamination. Laut DIN EN 12952-12:2003 und DIN EN 12953-10:2003 ist sicherzustellen, dass rückgeführtes Kondensat die Speisewasserqualität nicht beeinflusst. Gegebenenfalls ist eine Aufbereitung des Kondensates vorzusehen ( (14), (15)). Bei möglichen Kontaminationen wird unterschieden in Fremdstoffe, die die Leitfähigkeit anheben (z. B. Säuren, Laugen) und solchen, die die Lichtbrechung verändern (z. B. Öle, Fette, Benzin); (Bspw. ist das Kondensat von Dampfmaschinen mit Öl kontaminiert. Die Aufbereitung erfolgt mechanisch durch Aufschwimmen und Abtrennung. Ölreste werden mit Aktivkohlefiltern

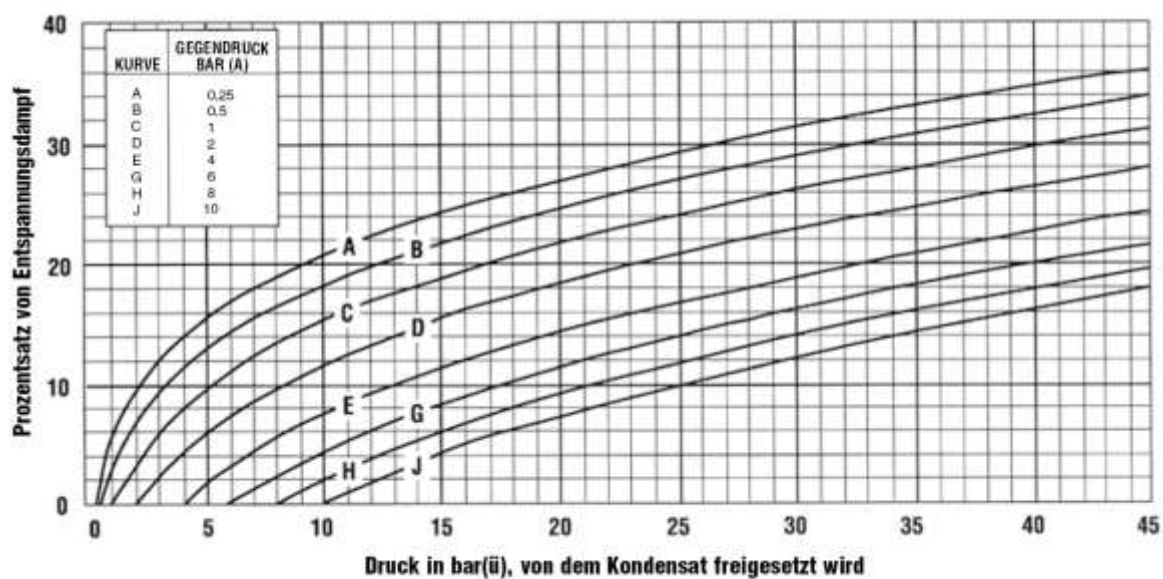


entfernt). Dementsprechend kann eine automatische Überwachung mittels Leitfähigkeitsmessung oder Trübungsüberwachung (auch Messung pH-Wert oder Gesamtkohlenstoff, TOC) erfolgen. Die Kondensate können verwendet werden, wenn eine Kontamination ausgeschlossen wurde.

### Wiederverwendung von Entspannungsdruck

Bei der Entspannung von unter Druck stehendem (Siede-)Kondensat oder der Entspannung von siedendem Kesselwasser oder Kesselschlamm (Absatzung oder Abschlammung) entsteht ein Teil Entspannungsdruck („Nachdampf“). Die Enthalpie (der Gesamtenergiegehalt) der beiden Medienströme (Kondensat und Entspannungsdruck) bleibt dabei in Summe unverändert, wobei der Entspannungsdruck einen größeren Enthalpieanteil als der Kondensatstrom beinhaltet. Nachfolgend ist dargestellt, welche Massenanteile an Entspannungsdruck bei unterschiedlichen Ein- und Ausgangsparametern der Kondensat- oder Siedewasserentspannung anfallen.

Abbildung A.2-3: Entstehender Entspannungsdruck in Abhängigkeit vom Druckverhältnis



Quelle: (16 S. 6), vgl. (17 S. 105)

Es ist ersichtlich, dass insbesondere bei größeren Druckverhältnissen erhebliche Wärmeverluste auftreten, wenn der entstehende Entspannungs-/Nachdampf ungenutzt in die Umgebung abgeleitet wird. Dessen Verwendung in einem Niederdrucksystem kann zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Die energetische Nutzung dieses Entspannungsdruckes (auch als Nachdampf bezeichnet) ist somit eine wesentliche Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz des Dampfsystems. Es bestehen folgende grundsätzlichen Nutzungsmöglichkeiten:

#### Prozessinterne Nutzung:

- ▶ Thermische Wasseraufbereitung: Sind prozessbedingt größere Mengen an Zusatzspeisewasser dem Dampfsystem zuzuführen, steigt der Bedarf an Heizdampf für die Entgasungsanlage. Statt den Entgaser mit Hochdruckdampf zu beheizen, kann Entspannungsdruck verwendet werden, wenn dieser mit leichtem Überdruck vorliegt.
- ▶ Einbindung in die Heizfläche einer dampfverbrauchenden Anlage: Ein Teil der Heizfläche wird abgetrennt und mit Entspannungsdruck versorgt. Das Angebot an Kondensat ist immer dann groß, wenn Entspannungsdruck zum Heizen benötigt wird.

- ▶ Alle Niederdruck-Wärmeübertrager bzw. -anwendungen, die bisher mit Hochdruckdampf über Reduzierung (Drosselung des Dampfdruckes) versorgt wurden, z. B. Verdampfer, Beheizungen durch Dampfeinspritzung etc..
- ▶ Verbraucher, die von einem Druck von 3 - 8 bar auf einen Betrieb mit 0,5 bar Überdruck umgestellt bzw. hierfür von vornherein ausgelegt werden können. Evtl. kann die Anschaffung eines zusätzlichen Wärmeübertragers zur Deckung des Spitzenbedarfes notwendig werden.
- ▶ Verbrennungsluftvorwärmung,
- ▶ Vorwärmung von Zusatz-Speisewasser,
- ▶ Der Entspannungsdruck kann mittels eines Thermoverdichters auf ein höheres Druckniveau angehoben und kann dort „konventionell“ nachgenutzt werden. Dazu wird Hochdruckdampf (sog. Treibdampf) eingesetzt, um den Niederdruck-Entspannungsdruck anzusaugen. Wenn Niederdruckdampf mit einem Überdruck von 0,5 bar zur Verfügung steht, sollte der Treibdampf mindestens einen Überdruck von 5 bar aufweisen (18 S. 4).

#### Betriebliche Nutzung:

Nutzung für Raumheizung oder Brauchwassererwärmung, wobei beachtet werden muss, dass in Zeiten geringen Heizungs- oder Warmwasserbedarfs nicht der gesamte Nachdampf genutzt werden kann. Die Auskopplung kann z. B. mit einem Kondensatentspanner oder einem Brüdenkondensator erfolgen.

#### **A.2.2.5 Dampferzeugung**

In nachfolgender Tabelle A.2-3 sind wesentliche Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Rückgewinnung dargestellt und im Anschluss textlich erläutert:

Tabelle A.2-3: Techniken und Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz im Bereich der Dampferzeugung

| Technik/Maßnahme                                          | Beschreibung                                                                                                                                  | Anwendbarkeit                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Betriebs- und Steuerungstechniken, Anlagendimensionierung | Einsatz einer Kesselfolgeschaltung                                                                                                            | Bei Standorten mit mehreren Kesseln                                                                                                         |
|                                                           | Installation von Rauchgasabsperklappen                                                                                                        | Alle Dampfkessel/-systeme,                                                                                                                  |
|                                                           | Kesseltyp, Dimensionierung, Anzahl der Kessel und Auslastung, Modulierende Brenner, Kesselsteuerung und Regelung, Dampfspeicher, Wärmedämmung | Für alle Kessel möglich in Abhängigkeit des Prozesses                                                                                       |
|                                                           | Einsatz von Economisern                                                                                                                       | Hauptsächlich für Großwasserraumkessel                                                                                                      |
| Speisewasservorwärmung                                    | Rauchgaskondensation (Brennwerttechnik)                                                                                                       | Bei Neuanlagen. Abhängig von Brennstoff. Bei hohem Anteil von rückgeführtem Kondensat ist ein separater Niedertemperaturkreislauf notwendig |
|                                                           | Nutzung von Prozessabwärme                                                                                                                    | Abhängig von Prozessführung                                                                                                                 |
|                                                           | Vorwärmung mittels Brüdenkondensator                                                                                                          | Abhängig von Prozessführung                                                                                                                 |
|                                                           | Verwendung von Entspannungsdruck                                                                                                              | Abhängig von Prozessführung                                                                                                                 |

| Technik/Maßnahme                                                    | Beschreibung                                                                                                                         | Anwendbarkeit                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                     | Externe Wasseraufbereitung (z. B. Ionenaustauscher, Umkehrosmose) sowie interne Wasseraufbereitung (Konditionierung mit Chemikalien) | Abhängig von Chemie des Rohwassers und Kesseltyp. Die notwendige Wasserqualität wird von Hersteller des Kessels bzw. aus Regelwerk vorgegeben (DIN EN 12952 bzw. 12953) |
| Vermeidung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen | Sammlung und Rückführung von Kondensat zum Speisewasserbehälter                                                                      | Abhängig von der Anwendung (z. B. bei Verwendung als Prozessdampf nicht möglich). Absalzung hauptsächlich für Großwasserraumkessel. Abschlämmung für alle Trommelkessel |
| Minimierung der Verluste durch der Absalzung und Abschlämmung       | Erhöhung der Qualität der Wasseraufbereitung                                                                                         | Für alle Kessel möglich                                                                                                                                                 |
|                                                                     | Installation einer automatischen Absalzregelung                                                                                      | Für alle Kessel möglich                                                                                                                                                 |
|                                                                     | Möglichst kurze Öffnungszeit des Abschlämmventils                                                                                    | Abschlämmung für alle Trommelkessel. Abhängig von Chemie des Rohwassers und Qualität der Wasseraufbereitung                                                             |
|                                                                     | Wärmerückgewinnung aus Absalzung/Abschlämmung                                                                                        | Vor allem bei niedriger Kondensatrückführrate                                                                                                                           |
| Optimierung der Entgasungsanlage                                    | Möglichst geringe Öffnungszeiten des Ventils des Entgasers, evtl. geregelt über die Sauerstoffkonzentration im Speisewasserbehälter  | Alle Standorte mit Entgasungsanlagen.                                                                                                                                   |
|                                                                     | Wärmerückgewinnung mittels Brüdenkondensator                                                                                         | Alle Standorte mit Entgasungsanlagen                                                                                                                                    |

Quelle: eigene Darstellung, GICON, 2018

### Anlagendimensionierung, Betriebs- und Steuerungstechniken

Die Kenntnis des Wärmelastprofils (Dampfbedarfs) der angeschlossenen Verbraucher ist bereits bei der Planung der Erzeugeranlagen zu berücksichtigen. Anzahl, Typ und Dimensionierung der Kessel sind auf dieser Basis genauso entscheidend für einen späteren energieeffizienten Betrieb wie die Auswahl der Brenner (Stufen- oder modulierende Brenner) und die Kesselsteuerungs- und Regeltechnik. An Standorten mit mehr als einem Kessel sollten Kesselfolgesteuerungen/ Kesselfolgeschaltungen vorgesehen werden, die die Betriebsweise der Kessel und deren Brenner optimiert dem tatsächlichen Bedarf anpassen. Für Dampfkessel, die nicht kontinuierlich betrieben werden, empfiehlt sich in jedem Fall die Installation von Rauchgasabsperrklappen zur Verhinderung des Auskühlens des Brennraumes außerhalb der Kesselbetriebszeiten.

### Speisewasservorwärmung

Die aus dem Abgas bzw. Prozess zurückgewonnene Wärme kann zur Vorwärmung des Speisewassers eingesetzt werden. Dadurch sinkt der zur Dampferzeugung notwendige Brennstoffbedarf und die Effizienz des Prozesses steigt. Es bestehen folgende grundsätzlichen Möglichkeiten:

#### Einsatz von Economisern und Brennwertwärmetauschern

Der Abgasverlust von Dampfkesseln ohne Wärmerückgewinnung kann bis zu 12 % betragen, da die Rauchgastemperaturen am Kesselaustritt aus physikalischen Gründen typischerweise ca. 60 – 80 K oberhalb der Sattedampftemperatur liegen (7 S. 43). Sattedampf bei einem Druck von 10 bar hat eine Temperatur von ca. 180 °C. Die Rauchgastemperatur liegt dementsprechend bei ca. 250 °C. Mit

**Economisern** ohne Brennwertnutzung können die Abgastemperaturen von Gaskesseln auf ca. 120–130 °C, bei Biomassekesseln auf ca. 160 °C abgesenkt werden. Das Speisewasser wird dabei von ca. 105 °C auf ca. 120 – 140 °C vorgewärmt. Die erreichbare Effizienzsteigerung ist abhängig von der erzielbaren Senkung der Rauchgastemperatur. Als Faustformel gilt, dass mit einer Absenkung der Rauchgastemperatur um 20-K eine Erhöhung der Effizienz des Kessel (Feuerungstechnischer Wirkungsgrad) um 1 %-Punkt erreicht wird. In der Praxis sind Effizienzsteigerungen von bis zu 7 %-Punkten realisierbar (10 S. 11). Wird Rauchgas kondensiert (Brennwertnutzung) sind Wirkungsgradsteigerungen von 5 % (19 S. 142 f.) bis 10 % erreichbar (10 S. 17), (20 S. 1).

Eine weitere Senkung der Rauchgastemperaturen kann durch die Verbrennungsluftvorwärmung, Zusatzspeisewasservorwärmung oder durch eine betriebsinterne Nutzung der Rauchgaswärme (z. B. Einbindung in ein Warmwassersystem) erreicht werden.

Der Einsatz (die Nachrüstung) eines Economisers sollte dann in Betracht gezogen werden, wenn (10 S. 15):

- ▶ die Abgastemperaturen für Gaskessel über 130 °C liegen (z. B. > 150 °C),
- ▶ die Abgastemperaturen > 100 °C liegen sowie ausreichend Niedertemperaturverbraucher vorhanden sind,
- ▶ bei 24 h- Schicht und hoher Kesselauslastung (auch unter 500 kW, z. B. ab Kesselleistungen > 75 kW bei Betriebsdrücken > 5 bar (21 S. 2),
- ▶ bei Einschichtbetrieb und einer Systemlast > 50 % für Kessel ab 2 MW Leistung,
- ▶ bei ausreichend vorhandenem Bauraum.

Die Nachrüstung bestehender Anlagen kann aufgrund des Raumbedarfes für die Wärmetauscher und die Komplexität (und Individualität) bestehender Anlagen nicht in jedem Fall möglich sein. Bei alten Bestandsanlagen (mit hoher Betriebszeit) kann eine Modernisierung der Kesselsteuerung notwendig werden.

Bei Nutzung der Brennwerttechnik muss auf die Verwendung von korrosionsbeständigen Werkstoffen für Wärmeübertrager und Kamin (bzw. Abgassystem) geachtet werden. Dies ist in Neuanlagen meist problemlos möglich (3 S. 17). Bei einem hohen Anteil an rückgeführtem (Siede-)Kondensat muss für die Brennwertnutzung ein separater Niedertemperaturkreislauf zur Verfügung stehen (3 S. 17). Dabei sollten kontinuierlich verfügbare Wärmesenken mit Temperaturen unterhalb des brennstoffabhängigen Taupunktes des Rauchgases vorhanden sein (7 S. 109).

Bei Flammrohrkesseln (Großwasserraumkessel) für industrielle Anwendungen sind Economiser als effizienzsteigernde Maßnahme bereits häufig integriert (22 S. 144).

### Verwendung von Abwärme

Mittels eines Wasser/Wasser-Wärmeübertragers kann Abwärme (z. B. aus einem Produktionsprozess) genutzt werden, um Speisewasser vorzuwärmen. In Abhängigkeit vom Temperaturniveau der Abwärme ist die Einkopplung des Wärmeübertragers beispielsweise in die Speisewasserzufuhr nach dem Kondensatbehälter möglich.

### Vorwärmung von kaltem Zusatz-Speisewasser

Je nach Anteil von nachzuspeisendem, aufbereitetem Zusatzspeisewasser kann dieses als Wärmesenke genutzt werden, um Verlustwärme aus einzelnen Prozessschritten zu minimieren:

- ▶ Wärmerückgewinnung durch Kondensation des Brühdampfes/Entspannungsdampfes aus Kondensatentspannern und Kondensatsammelbehältern sowie der Thermischen Wasseraufbereitung (Entgasung),
- ▶ Brennwertnutzung in einem dem Economiser bzw. Luftvorwärmer nachgeschalteten Brennwertwärmetauscher zur direkten Vorwärmung des Zusatzspeisewassers,

- ▶ Erhöhung der Effizienz des Abgaswärmetauschers (Economisers) durch Abkühlung des eintretenden, bereits entgasten Speisewassers: Mittels eines Wasser-Wasser-Wärmeübertragers („Speisewasserkühler“) wird dem bereits entgastem Speisewasser auf dem Weg zur Kesselanlage ein Teil seiner Wärme entzogen und auf das konditionierte, kalte Zusatzspeisewasser übertragen, welches dem Entgaser/der Thermischen Wasseraufbereitung zugeführt wird. Hierdurch reduziert sich der Energieaufwand für die Entgasungsanlage. Gleichzeitig sinkt die Temperatur des entgasten Speisewassers, wodurch das Abgas weiter abgekühlt werden kann und sich die Effizienz des Economisers erhöht.

#### Nutzung des Entspannungsampfes aus der Laugenentspannung

Bei der Absalzung wird das siedende Kesselwasser in einem „Laugenentspanner“ (Absalzenspanner) auf ca. 0,5 bar(ü) entspannt. Der entstehende Entspannungsampf kann dem Entgaser (der Thermischen Wasseraufbereitungsanlage) zugeführt werden und reduziert dort den Bedarf an Hochdruckampf.

#### **Vermeidung von Kesselsteinablagerungen auf Wärmeübertragungsflächen**

Im Wasser gelöste Erdalkalien (Calcium und Magnesium, sog. Härtebildner) fallen beim Erhitzen und in Anwesenheit von Kohlenstoffdioxid an Wärmeübertragungsflächen (Verdampfungszonen) aus und bilden (wasserseitig) einen festen Belag, den sog. Kesselstein. Die thermische Leitfähigkeit des Belages richtet sich nach seiner chem. Zusammensetzung und beträgt für gipsreichen Kesselstein 0,6 - 2,3 W/mK bzw. 0,08 - 0,18 W/mK für silikatreichen Kesselstein und ist damit wesentlich geringer als die von (blankem) Stahl (ca. 50 W/mK) (23 S. 84). Damit bildet sich eine wärmedämmende Schicht aus, die den Wärmeübergang zwischen Feuerungs- und Wasserseite behindert. Dies führt zu Beginn zu erhöhten Rauchgastemperaturen am Kesselaustritt und damit zu einer Wirkungsgradverschlechterung. Fortgeschrittene Belagbildung kann schließlich aufgrund mangelnder Wärmeabfuhr zur Zerstörung der Heizflächen führen. Verluste durch Kesselstein können bis zu 2 % bei Wasserrohrkesseln und bis zu 5 % bei Flammrohrkesseln betragen. Um dies zu verhindern, müssen vorbeugende Maßnahmen wie Wasseraufbereitung, Kondensatbehandlung und die Absalzung/Abschlammung angewendet werden (10 S. 14), (24 S. 1), die jeweils optimal auszulegen und zu betreiben sind (siehe auch nachfolgende Beschreibungen). Es können generell zwei Typen der Wasseraufbereitung unterschieden werden (25 S. 20):

- ▶ Externe Wasseraufbereitung: Entfernung (oder Modifikation) von Salzen vor Eintritt des Speisewassers in den Kessel:
  - Enthärtung mittels Ionentauscher (Austausch der Calcium- und Magnesium- Ionen gegen Natriumionen)
  - Teilentsalzung:
    - Umkehrosmose: Einsatz halbdurchlässiger (semipermeabler) Membranen zur Abscheidung im Wasser gelöster Salz-Ionen
    - Ionenaustausch („Entkarbonisierung“): Entfernung der Hydrogenkarbonatsalze des Calciums und Magnesiums (sog. Wasserhärte) mittels Ionenaustauscher, Abscheidung der entstehenden Kohlensäure und nachgeschaltete Enthärtung mittels Ionenaustauscher (siehe oben)
  - Vollentsalzung: Entfernung sämtlicher im Wasser gelöster Salze durch eine Kombination aus starksaurem Kationenaustauscher und starkbasischem Anionenaustauscher
- ▶ Interne Wasseraufbereitung (sog. Konditionierung): Zugabe von Chemikalien ins Speise- bzw. Kesselwasser zur Vermeidung von Kesselstein und Korrosion.



Der Aufwand für die Wasseraufbereitung ist abhängig von der Chemie des unbehandelten Speisewassers (Rohwasser), vom Kesseltyp sowie dessen Betriebsdruck. Die zulässigen Grenzwerte der Gesamthärte bzw. der Speisewasserqualität im Allgemeinen können der DIN EN 12953-10:2003 für Großwasserraumkessel (14) und der DIN EN 12952-12:2003 für Wasserrohrkessel entnommen werden (15). Häufig schreiben Hersteller von Dampferzeugern strengere Grenzwerte als die im Regelwerk aufgeführten vor.

### **Minimierung der Verluste durch der Absalzung und Abschlammung**

Während des Verdampfungsvorganges erhöht sich die Konzentration von Salzen und Schwebstoffen im Kesselwasser (auch Total Dissolved Solids, TDS). Dies führt zur Bildung von Belägen und verschlechtertem Wärmeübergang und begünstigt die Korrosion. Weiterhin kann sich Schaum bilden, welcher mit dem Dampf mitgerissen werden kann. Dadurch sinkt die Dampfqualität und es können nachfolgende Bauteile des Dampfsystems geschädigt werden. Durch die Absalzung wird in Großwasserraumkesseln ein Teil des Kesselwassers durch aufbereitetes Speisewasser ersetzt, womit die Salzkonzentration unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte gehalten werden kann. Die Abschlammung dient dazu, die sich am Kesselboden bildende Schlammsschicht aus Härtebildnern zu entfernen (10 S. 20). Wichtigste Maßnahme zur Verhinderung von Verlusten im Zusammenhang mit Abschlamm- und Absalzverluste ist die Rückführung möglichst großer Kondensatmengen und damit die Begrenzung der Zufuhr von Zusatzspeisewasser, welches nicht entsalzt bzw. konditioniert werden muss. Die Wärmeverluste durch Absalzung und Abschlammung lassen weiterhin durch folgende Maßnahmen reduzieren:

- ▶ Erhöhung der Qualität der Wasseraufbereitung. Je geringer die Konzentration der im Speisewasser gelösten Salze ist, desto seltener muss die Absalzung erfolgen. Die Wärmeverluste durch Absalzung sinken proportional zur Steigerung der Qualität der Wasseraufbereitung. Weiterhin wird Speisewasser thermisch entgast und, in Abhängigkeit von der Speisewasserqualität, auf chemischen Weg Restsauerstoff und Resthärtebildner gebunden.
- ▶ Installation einer Absalzungsregelung (automatische Absalzung). Eine im Kessel montierte Elektrode misst die Leitfähigkeit des Kesselwassers und öffnet bei Erreichen eines Grenzwertes das Absalzventil. Dadurch kann die Zuverlässigkeit der Anlage bei minimalen Wärmeverlusten durch Absalzung gewährleistet werden. Die zulässigen Grenzwerte sind durch den Kesselhersteller bzw. durch Regelwerke vorgegeben (14).
- ▶ Möglichst kurze Öffnungszeit des Ventils zur Abschlammung
- ▶ Wärmerückgewinnung: siehe A.2.2.4

### **Energetische Optimierung der Entgasungsanlage (Thermische Wasseraufbereitungsanlage)**

Mit der thermischen Wasseraufbereitung (Entgasung) werden die im Wasser gelösten Gase Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) ausgetrieben. Dies ist notwendig, da die Löslichkeit der Gase mit steigender Temperatur abnimmt und diese während der anschließenden Verdampfung vollständig freigesetzt werden. Freier  $O_2$  geht chemische Verbindungen mit ferritischem Stahl ein, was in Folge zu Korrosion im Kessel führt (sog. Lochfraß). Mit der Entgasungsanlage werden die Konzentrationen der Gase auf ein Maß reduziert, bei dem die Korrosion minimiert wird. Dazu werden das Speisewasser sowie das rückgeführte Kondensat bis zum Siedepunkt erwärmt und bei geringem Überdruck und einer Temperatur von ca. 105 °C gehalten, wodurch die Wiederaufnahme von Gasen verhindert wird (7 S. 60). Die akzeptierte  $O_2$ -Konzentration ist abhängig vom Betriebsdruck der Anlage. Die Richtwerte der  $O_2$ -Konzentration sind in DIN EN 12952-12:2003 sowie DIN EN 12953-10:2003 festgelegt ( (14), (15)). Bei Entgasungsanlagen kann unterschieden werden in:

- ▶ Hochdruckanlagen: Es erfolgt eine Vollentgasung bei einem Betriebsdruck von 1,1 - 1,3 bar(a) (entspricht ca. 102 - 108 °C) (7 S. 60),
- ▶ Niederdruckanlage, kleine Leistung, niedriger Druck und/oder hoher Kondensatrückfluss: Es erfolgt häufig eine Teilentgasung unter atmosphärischem Druck (ca. 90 °C). Der im Vergleich zur

Vollentgasung höhere Anteil an O<sub>2</sub> muss mittels Sauerstoffbindemitteln reduziert werden (chemische Nachbehandlung) (7 S. 61).

Die Aufheizung des Speisewassers auf Siedetemperatur erfolgt über Dampfplantzen im Speisewasserbehälter. In einem auf den Speisewasserbehälter aufgesetzten Entgaserdom wird das Zusatzwasser und Kondensat häufig im Gegenstrom über Verteiler und Rieselbleche erwärmt. Die freigesetzten Gase steigen mit dem nicht kondensierten Teil des Heizdampfes auf und entweichen als Brügendampf aus dem Entgaser. Die dadurch entstehenden Energieverluste können folgendermaßen minimiert werden (10 S. 29 f.):

- ▶ Die Öffnungszeit des Ventils des Entgasungsbehälters sollte so kurz wie möglich gewählt werden, um eine zufriedenstellende Entgasung bei minimalem Energieverlust zu erreichen. Keinesfalls sollte die Entgasungsöffnung dauerhaft geöffnet sein. Die Regelung der Öffnung kann bspw. über die Sauerstoffkonzentration des Wassers im Entgasungsbehälter erfolgen oder in Abhängigkeit des Zuströmens von Zusatzwasser.
- ▶ In größeren Anlagen kann die Enthalpie des Brügendampfes mittels eines Brüdenkondensators zur Vorwärmung des aufbereiteten Zusatzwassers genutzt werden (siehe A.2.2.4).

## **A.3 Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme**

### **A.3.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme**

#### **A.3.1.1 Definition von Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsystemen und Abgrenzung zu anderen Querschnittstechnologien**

Wärme kann ohne von außen zugeführte Arbeit nur von einem Zustand höherer Temperatur zu einem Zustand niedrigerer Temperatur strömen. Wärmeströme, die von Prozessen, Systemen oder Bauteilen an die Umgebung gezielt (Kühlung) oder ungewollt (Verluste) abgegeben werden, heißen Abwärmeströme. Abwärme entsteht bei fast allen industriellen Prozessen. Daher sind die Techniken zur Erfassung, Verwertung und ggf. Abführung von Abwärme als eine spezielle Gruppe von Querschnittstechnologien zu betrachten.

Das Ziel einer effizienten Prozessgestaltung muss darin bestehen, Abwärmeströme

1. zu vermeiden,
2. auf ein unvermeidliches Mindestmaß zu reduzieren oder
3. zu möglichst großen Teilen zurückzugewinnen und zu nutzen. Voraussetzung für eine sinnvolle Wärmerückgewinnung ist das Vorhandensein passender Wärmeverbraucher. Ist kein geeigneter Wärmeverbraucher vorhanden, muss
4. die nicht nutzbare Abwärme mit minimalem Aufwand an Hilfsenergie und unter Beachtung minimaler sonstiger Umweltauswirkungen an die Umgebung abgeführt werden (Rückkühlung).

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit Techniken für die Optionen 3. und 4..

Abwärmeströme können entsprechend der Ausprägung der Wärmequelle wie folgt eingeteilt werden:

(I) Diffuse Abwärmeströme, z. B. Strahlung aus Öffnungen von Brennöfen, Strahlung und Konvektion von heißen Bauteiloberflächen bzw. abkühlenden Werkstücken.

(II) Stoffgebundene Abwärmeströme wie

- Heiße Verbrennungsabgase (z. B. aus Wärmekraftmaschinen),
- Heiße/warme Abgase/Abluft aus thermischen oder Trocknungsprozessen bzw. aus luftbasierten Kühlsystemen (z. B. Kondensatoren von Kältemaschinen),
- Flüssige Wärmeträger aus Kühlsystemen unterschiedlichster Anlagen (z. B. Kühlwasser aus Motoren, Thermoöle),
- Überhitzter bzw. kondensierender Wasserdampf aus Prozessdampfsystemen (z. B. aus verfahrenstechnischen bzw. Formgebungsprozessen).

Die Wärmerückgewinnung aus stoffgebundenen Abwärmequellen ist technologisch deutlich einfacher zu realisieren (z. B. durch Wärmeübertrager) als aus diffusen Quellen.

Die „Qualität von Wärme“ und damit deren Wiederverwendbarkeit steigt mit der Temperatur (Exergie der Wärme). Man kann grob unterscheiden in

- ▶ Hochtemperaturwärme (Temperatur > 350 °C), z. B. aus heißen Abgasen,
- ▶ Mitteltemperaturabwärme (Temperatur 80 ... 350 °C), z. B. aus Thermoölen oder kondensierendem Wasserdampf und
- ▶ Niedertemperaturwärme (Temperatur < 80 °C), z. B. aus Warmwasser oder Abluft.



## **Wärmerückgewinnungstechnologien**

Für die Praxis ist die Unterscheidung nach zwei Grundprinzipien relevant (26):

- ▶ **Direkte Wärmerückgewinnung:** Dient die Abwärme der Deckung von Wärmebedarfen von Verbrauchern und kommen zur Deckung dieser Bedarfe nur Wärmeübertrager und thermische Speicher zum Einsatz spricht man von einer direkten Wärmerückgewinnung bzw. Abwärmenutzung.
- ▶ **Indirekte Wärmerückgewinnung:** Wird die Abwärme durch den Einsatz einer Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau angehoben, in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt oder dient als Antriebsenergie für einen weiteren Prozess (z. B. Antriebsenergie einer Adsorptions- oder Absorptionskältemaschine), spricht man von indirekter Wärmerückgewinnung.

## **Rückkühlsysteme**

Rückkühlsysteme kommen dann zum Einsatz, wenn Abwärme aus einem Prozess abgeführt werden muss und dabei nicht genutzt (zurückgewonnen) werden kann. Dabei handelt es sich meist um Niedertemperatur-Abwärme, z. B. aus Kondensations-Kraftwerken oder thermischen Prozessen in Industrie und Gewerbe. Die Abwärme muss dann an die Umgebung abgegeben werden, z. B. an die Atmosphäre oder fließende bzw. stehende Gewässer. Ziel ist die Rückkühlung des Abwärme-Trägermediums in den Bereich der Umgebungstemperatur.

### **Abgrenzung zu anderen Querschnittstechnologien:**

Sowohl Wärmerückgewinnungstechniken als auch Rückkühlsysteme setzen oft Komponenten ein, welche ebenfalls Querschnittstechnologien darstellen, insbesondere Pumpen, Ventilatoren und elektrische Antriebe.

Außerdem werden Wärmerückgewinnungstechniken und Rückkühlsysteme oft mit anderen Querschnittstechnologien kombiniert, dies betrifft vor allem Feuerungsanlagen, Dampfsysteme, Raumluftheiztechnische Anlagen, Druckluftanlagen und Trocknungsprozesse. Überschneidungen in der Darstellung sind daher nicht völlig vermeidbar. Die technologiespezifischen spezielleren Informationen sind in der Regel in den jeweiligen Technologiekapiteln enthalten. Im vorliegenden Kapitel werden vor allem die Techniken

- ▶ der Wärmeübertrager,
- ▶ der thermischen Speicher sowie
- ▶ der indirekten Wärmerückgewinnung

zusammenfassend dargestellt.

### **A.3.1.2 Bagatellschwellenprüfung**

Grundsätzlich ist eine Wärmerückgewinnung immer dann sinnvoll, wenn der dafür erforderliche energetische und investive Aufwand deutlich geringer ist im Vergleich zu der ersetzten Endenergiemenge im Fall ohne Wärmerückgewinnung. Eine Festlegung konkreter Bagatellschwellen für vertiefende Prüfungen in Genehmigungsverfahren ist wegen der enormen Vielfalt technischer und standortspezifischer Randbedingungen nicht sinnvoll.

Insbesondere Möglichkeiten der direkten Abwärmenutzung (z. B. für die Beheizung von quellennahen Arbeitsräumen) sind auch bei relativ kleinen Leistungen und auch im Niedertemperaturbereich oft wirtschaftlich. Technisch ist dies oft sehr naheliegend und wird auf Grund der ökonomischen Vorteile auch realisiert. Eine besondere Prüfung ist dafür in der Regel entbehrlich.

Für die technisch aufwändigere indirekte Wärmerückgewinnung ist zumindest als Orientierung von folgenden Größenordnungen auszugehen, bei denen die Prüfung von Techniken zur Abwärmenutzung bereits im Genehmigungsverfahren zu empfehlen ist:

- ▶ Hochtemperaturbereich ( $> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): ab einer kontinuierlich abzuführenden Abwärmeleistung von 10 kW bei einzelnen Punktquellen, bei diskontinuierlichem Anfall oder verteilten Quellen nur bei entsprechend höheren Leistungen,
- ▶ Mitteltemperaturbereich ( $80\text{ }^{\circ}\text{C} - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ab einer kontinuierlich abzuführenden Abwärmeleistung von 50 - 100 kW bei einzelnen Punktquellen, bei diskontinuierlichem Anfall oder verteilten Quellen nur bei entsprechend höheren Leistungen.

Im Niedertemperaturbereich ist die indirekte Wärmerückgewinnung (mit Einsatz von Wärmepumpen) insbesondere dann relevant, wenn sich entsprechende Wärmeverbraucher in näherer Umgebung befinden. Dies können auch Wärmenetze sein, die Wärme aufnehmen und dadurch den Endenergieeinsatz bei den Haupterzeugungsanlagen reduzieren. Wegen der Kosten für den Wärmepumpenbetrieb und den leitungsgebundenen Wärmetransport sind wirtschaftliche und ökologische Vorteile meist erst ab einer kontinuierliche Abwärmeleistung  $>100\text{ kW}$  zu erwarten. Diese als Orientierungswert zu verstehende Leistungsangabe erhöht sich um 50 - 100 kW je 100 m Transportentfernung, in Abhängigkeit von örtlichen Randbedingungen und Aufwendungen für die Installation der Leitungstrasse.

#### **A.3.1.3 Systembetrachtung zur Abwärmenutzung**

Zur Untersuchung der Abwärmenutzungspotenziale ist zunächst ein standortspezifisch sinnvoller Bilanzraum festzulegen (z. B. lokale Grundstücksgrenzen des Unternehmensstandortes, räumlich zusammenhängende Teile eines Standortes oder darüber hinaus gehend z. B. incl. Nachbargrundstücke). Im Bilanzraum sollte zunächst eine systematische Analyse der Wärmequellen und -senken erfolgen. Relevante Punkte sind:

- ▶ die Abwärmemenge bzw. die Abwärmeleistung sowie deren zeitliche Verfügbarkeit (kontinuierlich oder schwankend),
- ▶ das Temperaturniveau der Abwärme und deren Erscheinungsform (diffuse Abwärme, gasförmiger oder flüssiger Wärmeträger),
- ▶ das Vorhandensein von Wärmeverbrauchern mit den passenden Spezifikationen zur Nutzung der verfügbaren Abwärme.

Weiterhin sind für eine wirtschaftliche Einschätzung folgende Punkte zu klären:

- ▶ Ist die Temperatur der Abwärmequelle höher als die der Wärmesenken (Verbraucher)? Falls nein, sind für eine eventuelle Nutzung Wärmepumpen und damit Zusatzenergie erforderlich.
- ▶ Ist die Abwärmeleistung dauerhaft größer als die Wärmeleistung der Verbraucher? Falls nein, müssen zusätzliche Wärmeerzeuger bereitgehalten werden.
- ▶ Stimmen der zeitliche Verlauf der Abwärmebereitstellung und des Wärmebedarfes überein? – Falls nein, werden zusätzlich Wärmespeicher benötigt.

#### **A.3.2 Stand der Technik bezüglich der Technologien zur Wärmerückgewinnung und Rückkühlung**

##### **A.3.2.1 Wärmeübertrager**

Die direkte Wärmerückgewinnung wird durch Wärmeübertrager realisiert, wobei Energie von einem Fluid (Flüssigkeit/Gas) mit einer höheren Temperatur auf ein Fluid niedrigerer Temperatur übertragen wird. Technologisch unterscheidet man Mischwärmeübertrager (nur bei gleicher Qualität des Fluids einsetzbar) und Oberflächenwärmeübertrager. Die häufigsten Bauformen sind:

- ▶ Rekuperatoren – beide Fluide strömen durch den Wärmeübertrager (z. B. Platten- oder Rohrbündel-Wärmeübertrager),
- ▶ Regeneratoren – die Fluide strömen zeitlich alternierend über eine (rotierende) Speichermasse (z. B. Luftvorwärmer),

- ▶ „Rührkessel-Wärmeübertrager“ – Sonderform eines Rekuperators, eines der Fluide befindet sich ruhend in einem Behälter, oft in Kombination mit dessen Speicherfunktion (z. B. Warmwasserbereiter)

Die wichtigsten Kriterien für eine möglichst hohe Energieeffizienz von Systemen mit Wärmeübertragern sind:

- ▶ Korrekt berechnete Auslegungsleistung (bei vorgegebenen Fluidtemperaturen ist die Leistung eines Wärmeübertragers (WÜ) proportional zum Wärmedurchgangskoeffizienten und zur Trennfläche zwischen den Fluiden),
- ▶ langfristig wirkende Maßnahmen gegen Verschmutzungen der WÜ-Oberflächen, da diese den Wärmedurchgangskoeffizienten verschlechtern (z. B. Möglichkeit der regelmäßigen Reinigung vorsehen),
- ▶ bei Vergrößerung der WÜ-Fläche zwecks Leistungserhöhung z.B. durch Rippen, Lamellen oder eine Profilierung der Übertragerfläche beachten, dass dadurch Druckverluste steigen, was die erforderliche Hilfsenergie erhöht und die Verschmutzungsneigung zunimmt.

100 % der Abwärme für neue Nutzungen zurückzugewinnen ist nicht möglich. Bei Mischwärmeübertragern ist dies zwar näherungsweise der Fall, allerdings nur in Verbindung mit einem erheblichen Exergieverlust infolge der Absenkung des Temperaturniveaus. Bei Oberflächenwärmeübertragern können theoretisch auch sehr hohe Rückgewinnungsgrade von 90 % bei insgesamt höherem nutzbarem Temperaturniveau erreicht werden, allerdings nehmen der apparative Aufwand, der Raumbedarf und der Hilfsenergiebedarf mit zunehmendem Rückgewinnungsgrad überproportional zu. Daher ist die Auslegung von Wärmeübertragern immer mit einer wirtschaftlich-technischen Optimierungsaufgabe verbunden.

#### **A.3.2.2 Wärmespeicher**

Wärmespeicher dienen der Überbrückung zeitlicher, bei mobilen Speichern auch örtlicher Diskrepanzen zwischen der Bereitstellung von Wärme (Abwärme) und deren Bedarf (Nutzwärme).

Die Speicherung von Energie kann in 3 Phasen unterteilt werden:

1. Beladen (Zufuhr überschüssiger Energie in den Speicher)
2. Bereitschaftsphase (kein Energiestrom in den oder aus dem Speicher, außer Bereitschaftsverluste)
3. Entladen (Abführen der zuvor gespeicherten Energie)

Es gibt drei unterschiedliche physikalische Prinzipien zur Speicherung thermischer Energie:

- ▶ sensible Wärmespeicher (Wärmeeintrag/-abfuhr führt zu Temperaturerhöhung),
- ▶ latente Wärmespeicher (Wärmeeintrag/-abfuhr führt zu Phasenwechsel),
- ▶ sorptive Wärmespeicher (Wärmeeintrag/-abfuhr führt zu Auflösung bzw. Herstellen von Verbindungen in einem Zweistoffsystem)

Be- und Entladevorgänge von Speichern führen immer zu Verlusten. In der Bereitschaftsphase treten Verluste nur in sensiblen oder latenten Speichern auf. Diese Verluste können durch eine entsprechende Wärmedämmung minimiert werden.

Bei der Auswahl von Wärmespeichern sind folgende Aspekte zu betrachten:

- ▶ das Temperaturniveau der anfallenden Abwärme und der benötigten Nutzwärme,
- ▶ die Speicherkapazität (speicherbare Wärmemenge),
- ▶ die Speicherleistung (übertragbare Wärmemenge pro Zeiteinheit beim Laden/Entladen),
- ▶ der zeitliche Leistungsverlauf an der Wärmequelle (Abwärmeressource) und der Wärmesenke (Nutzwärmeverbraucher) sowie

- weitere Kriterien wie ökonomische, ökologische und sicherheitstechnische Aspekte.

Der energetische Wirkungsgrad  $\eta_{en}$  eines Wärmespeichers berechnet sich wie folgt:

Formel A.3-1

---

$$\eta_{en} = \frac{\text{ausgespeicherte Wärmemenge}}{\text{eingespeicherte Wärmemenge} + \text{Hilfsenergie}}$$

Bei kurzen Bereitschaftsphasen (hohe Zyklenzahlen) und thermisch gut gedämmten Speichern sind energetische Wirkungsgrade  $\eta_{en} > 0,9$  Stand der Technik.

#### A.3.2.2.1 Sensible Wärmespeicher

Wie bereits beschrieben, erhöht sich bei sensiblen Wärmespeichern bei der Be- und Entladung die Temperatur des Speichermediums. Der Wärmeinhalt berechnet sich nach der Gleichung

Formel A.3-2

---

$$Q_{\text{Speicher}} = \frac{1h}{3600s} \varrho c_p V \Delta T$$

Das am weitesten verbreitete Beispiel eines sensiblen Wärmespeichers ist der Warmwasserspeicher. Bis zu einer maximalen Speichertemperatur von 95 °C können diese Speicher als drucklose Anlagen ausgeführt werden. Sind höhere Temperaturen erforderlich, muss der Druck im Speicher angehoben werden um ein Sieden des Speichermediums zu verhindern. Dadurch sind die Speicher als Druckgeräte einzustufen und unterliegen den Vorgaben aus der dazugehörigen Richtlinie.

Alternativ kann bei hohen Temperaturen Thermoöl als Speichermedium eingesetzt werden. Die Einsatzgrenzen liegen bei ca. 380 °C da Thermoöle oberhalb dieser Temperatur nicht mehr thermisch stabil sind. Nachteile von Thermoölspeichern sind die deutlich geringeren Speicherkapazitäten bei gleichem Speichervolumen, wodurch sie erst bei Speichertemperaturen oberhalb 100 °C rentabel werden, wenn wasserbasierte Speicher erhöhten Anforderungen unterliegen.

Sowohl Wasserspeicher als auch Thermoölspeicher können direkt und indirekt be- und entladen werden.

Auch Feststoffe (z. B. Schotter) können als Speichermedien eingesetzt werden, wobei die Be- und Entladung immer indirekt erfolgt. Vorteilhaft für Feststoffspeicher ist die hohe thermische Beständigkeit bis zur Schmelztemperatur.

#### A.3.2.2.2 Latente Wärmespeicher

Im Gegensatz zu sensiblen Wärmespeichern führt eine Zufuhr an Wärme nur teilweise zu einer Temperaturänderung, da ein Großteil der Wärme über den Phasenwechsel als Schmelz- oder Verdampfungsenthalpie gespeichert wird. Die weitgehende Temperaturkonstanz sowie eine hohe volumenbezogene Speicherkapazität sind die wesentlichen Vorteile der latenten Wärmespeicher gegenüber sensiblen Speichern. Nachteilig sind die tendenziell geringeren Be- und Entladeleistungen.

Der Wärmeinhalt eines latenten Wärmespeichers berechnet sich gemäß der Formel:

Formel A.3-3

---

$$Q_{\text{Speicher}} = \frac{1h}{3600s} m_{\text{Speicher}} (\Delta h_{\text{Phasenwechsel}} + c_p \Delta T)$$

Die Be- und Entladung eines latenten Wärmespeichers erfolgt mit Ausnahme weniger Sonderfälle immer indirekt, d. h., Wärmeträgermedium und Wärmespeichermedium sind durch einen Wärmeübertrager getrennt.

Bekannte Speichermedien für die Speichertechnologie sind Paraffine (Wachs), andere organische PCM (PCM – Phasenwechselmedien (engl. Phase-change-material)), Salzhydrate und Salze.

Sonderfälle, die ohne zusätzliche Medientrennung arbeiten, sind der Nassdampf- bzw. Gefälle-Speicher (in Wasser-Dampf-Systemen) sowie derzeit noch nicht als BVT verfügbare, in der Entwicklung befindliche PCM-Speicher mit hochmolekularen Stoffen extrem hoher Zähigkeit in der Flüssigphase (flüssige Phase bleibt formstabil).

Die Wärmeleitfähigkeit von PCM ist relativ gering, wodurch die Leistung der Be- und Entladung begrenzt wird. Dieser Nachteil kann durch spezielle Speicherkonstruktionen kompensiert werden.

An den Wärmeübertrager werden hohe Anforderungen gestellt, da er

- ▶ kompatibel mit beiden Medien sein muss,
- ▶ dauerhaft eine sichere Trennung der beiden Medien gewährleisten muss und
- ▶ den thermischen und mechanischen Belastungen standhalten muss, die durch die Temperaturunterschiede und den Phasenwechsel des Speichermediums resultieren

Technisch möglich sind auch Kombinationen aus latenten und sensiblen Wärmespeichersystemen, die z. B. die Speicherkapazität erhöhen können. Im Bereich der latenten Wärmespeicher sind seit einigen Jahren hohe Innovationsraten zu beobachten, was zu einer Verbreiterung der BVT führen wird.

#### A.3.2.2.3 Sorptive Wärmespeicher

Sorptive Wärmespeicher nutzen zur Wärmespeicherung die physikalische oder chemische Bindungsenergie eines Zweistoffsystems, wobei eine Komponente in jedem Fall gasförmig ist.

Man unterscheidet die Funktionsprinzipien Ab- und Adsorptions-Wärmespeicher (physisorptiv, nutzen die Lösungswärme bzw. physikalische Bindungswärme) sowie thermochemische Speicher (chemisorptiv, basieren auf umkehrbaren chemischen Reaktionen). Die Vorteile dieser Speichertechnologien liegen in hohen Speicherdichten (bis zu 1.000 kWh/m<sup>3</sup> und mehr) und in der Tatsache, dass der beladene Wärmespeicher nahezu unbegrenzt verlustfrei in Bereitschaft bleiben kann, wenn die Komponenten des Stoffsystems getrennt gelagert werden. Nachteile sind die sehr aufwändige Technologie und das ggf. große Speichervolumen für die gasförmige Komponente des Stoffsystems. Letzteres kann vermieden werden, wenn die gasförmige Komponente aus der Umgebungsluft kommt (Wasserdampf aus Luftfeuchte), dann handelt es sich um ein offenes Speichersystem.

Sorptive Wärmespeicher befinden sich aktuell noch in der Entwicklung und können daher noch nicht als BVT eingestuft werden.

### A.3.2.3 Wärmepumpen

#### A.3.2.3.1 Einsatzkriterien unter dem Aspekt der Energieeffizienz

Wärmepumpen transformieren Wärme von einem niedrigen Temperaturniveau im Bereich der Umgebungstemperatur – und damit niedrigen Exergieniveau – auf ein höheres Temperatur- bzw. Exergieniveau. In industriellen Anlagen können sie einen Beitrag zur Energieeffizienz leisten, indem ansonsten nicht mehr nutzbare Abwärmeströme mit Temperaturen geringfügig über der Umgebungstemperatur auf ein höheres prozess- oder versorgungstechnisch benötigtes Niveau gehoben werden. Der Zielprozess ist somit auf der Seite der höheren Temperatur.

Typische Niedertemperatur-Wärmequellen liegen zwischen Umgebungstemperatur und 40 ... 50 °C und können Bestandteil der Umgebung (Erdreich, Wasserreservoir, Umgebungsluft) oder industrielle Abwärmeträger sein. Die Temperaturen der den Zielprozess bildenden Wärmesenke im gewerblichen oder industriellen Bereich, z. B. Heizungsanlagen, können bis rund 100 °C reichen, bei Adsorptions-Wärmepumpen auch höher.

Allerdings wird dafür zusätzliche Energie bzw. Exergie benötigt, entweder in Form elektrischer Energie oder thermischer Energie (Wärme). Daher ist der ökologische und ökonomische Effekt des Einsatzes von Wärmepumpen stets durch eine der technischen Planung und Realisierung vorgeschaltete Systembetrachtung zu bewerten.

Die Anwendung von Wärmepumpen ist ökologisch sinnvoll,

- ▶ wenn damit exergetisch wertvollere Wärme höherer Temperatur substituiert wird, die sonst aus Wärmequellen auf Basis fossiler Brennstoffe erzeugt werden müsste und
- ▶ die zusätzliche nicht regenerativ erzeugte Energiemenge für den Antrieb der Wärmepumpe deutlich geringer ist als die substituierte Energiemenge.

Bauarten von Wärmepumpen werden nach Funktionsprinzipien unterschieden:

1. Kompressions-Wärmepumpen verfügen über einen mechanischen Verdichter,
2. Absorptions-Wärmepumpen über einen sog. thermischen Verdichter.  
Diese beiden Bauformen sind dadurch gekennzeichnet, dass die jeweiligen Arbeitsmittel in geschlossenen Systemen zirkulieren.
3. Adsorptions-Wärmepumpen als drittes technologisches Grundprinzip arbeiten ebenfalls mit geschlossenen Systemen, beruhen aber auf dem physikalischen Prinzip der Bindungswärme von Fluiden an festen Oberflächen.  
Eine Sonderform, technologisch ähnlich Kompressions-Wärmepumpe, stellt die
4. mechanische Brüdenkompression  
als halboffene Wärmepumpe dar. Sie kann insbesondere eingesetzt werden, wenn Prozessabdampf (als Brüden bezeichnet, meist Wasserdampf) niedriger Temperatur zur Verfügung steht und Wärme höherer Temperatur benötigt wird.

#### A.3.2.3.2 Energetische Bewertung von Wärmepumpen

Kompressions-Wärmepumpen und Mechanische Brüdenkompression

Die Effizienz einer Kompressions-Wärmepumpe wie auch einer mechanischen Brüdenkompressionsanlage wird durch die sog. Leistungszahl bzw. Coefficient of Performance (COP) angegeben. Dabei werden der Nutzen – der an die Wärmesenke abgegebene Kondensatorwärmestrom – und der Aufwand – die elektrische Antriebsleistung des Verdichters – ins Verhältnis gesetzt:

Formel A.3-4

---

$$COP = \frac{\text{Kondensatorwärmestrom}}{\text{Verdichterantriebsleistung}} \rightarrow [COP] = 1 \frac{kW_{th}}{kW_{el/mech}}$$

Kompressions-Wärmepumpen können Leistungszahlen bis 6,0 erreichen, das bedeutet, dass mit Hilfe einer elektrischen Antriebsleistung von 1 kW insgesamt 6 kW Hochtemperaturwärme erzeugt werden, wobei der Niedertemperatur-Abwärmequelle 5 kW thermische Leistung entzogen werden. Bei mechanischen Brüdenkompressionsanlagen besteht eine starke Abhängigkeit des COP von der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke, ökologisch und wirtschaftlich sind Anlagen mit einem COP > 5.

Durch die Jahresarbeitszahl JAZ werden, im Unterschied zur Leistungszahl COP, alle im Verlaufe eines Jahres auftretenden Lastzustände einer Kompressions-Wärmepumpe erfasst und nicht nur der



Idealzustand des Volllastbetriebes. Die Jahresarbeitszahl setzt die im Laufe eines Jahres erzeugte Nutzwärme ins Verhältnis zur im gleichen Zeitraum verbrauchten elektrischen Arbeit:

Formel A.3-5

$$JAZ = \frac{\text{Kondensatorwärme pro Jahr}}{\text{Verdichterarbeit pro Jahr}} \rightarrow [JAZ] = 1 \frac{kWh_{th}/a}{kWh_{el}/a}$$

Da elektrische Energie auch direkt und nahezu verlustfrei in Wärme fast jeder beliebigen Temperatur umgewandelt werden kann, muss die Jahresarbeitszahl JAZ einer Kompressions-Wärmepumpe höher sein als das Verhältnis zwischen Strom- und Wärmebezugskosten des jeweiligen Anwenders (siehe betriebswirtschaftliche Aspekte). Nach (27 S. 35) sollten bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von mindestens 4 erreicht werden.

#### Absorptions- und Adsorptions-Wärmepumpen

Die Effizienz einer Absorptions-Wärmepumpe wird durch ein Wärmeverhältnis, die sog. Heizzahl, angegeben. Diese setzt wiederum den energetischen Nutzen – den im Kondensator an die Wärmesenke abgegebenen Wärmestrom – ins Verhältnis zum Aufwand – den dem Austreiber durch den Gasbrenner zugeführten Wärmestrom:

Formel A.3-6

$$\text{Heizzahl} = \frac{\text{Kondensatorwärmestrom}}{\text{Austreiberwärmestrom}} \rightarrow [\text{Heizzahl}] = 1 \frac{kW_{th}}{kW_{th}}$$

Typische Heizzahlen von Absorptions-Wärmepumpen liegen bei ca. 1,5. Auch hier ist es zur Berechnung einer jahresgemittelten Effizienz sinnvoll, eine Jahresarbeitszahl JAZ zu definieren.

Formel A.3-7

$$JAZ = \frac{\text{Kondensatorwärme pro Jahr}}{\text{Austreiberwärme pro Jahr}} \rightarrow [JAZ] = 1 \frac{kWh_{th}/a}{kWh_{th}/a}$$

Bei gasbeheizten Wärmepumpen kann die Austreiberwärme pro Jahr näherungsweise aus dem Jahresbrennstoffverbrauch und dem Heizwert des Brennstoffes berechnet werden. Nach (27 S. 35) sollten bei derartigen Wärmepumpen Jahresarbeitszahlen von mindestens 1,2 erreicht werden.

#### A.3.2.4 Absorptions- und Adsorptions-Kältemaschinen

Die thermodynamischen Prozesse in Kompressions-, Absorptions- und Adsorptions-Wärmepumpen finden in vergleichbarer Form auch in entsprechenden Kältemaschinen Anwendung. Hauptaufgabe von Kältemaschinen ist aber der Wärmeentzug in der Prozessebene (Zielprozess befindet sich auf der kalten Seite unterhalb der Umgebungstemperatur).

Ad-/Absorptions-Kältemaschinen können unter dem Aspekt der Energieeffizienz besonders dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn als Antriebsenergie Abwärme auf einem Temperaturniveau oberhalb von ca. 80°C zur Verfügung steht, die ansonsten nicht genutzt werden würde. Das Ziel besteht dann in der Substitution von Kälte, die ansonsten mit Hilfe von Kompressions-Kältemaschinen unter Verbrauch elektrischer Energie erzeugt werden müsste. Dabei entspricht der Elektroenergieverbrauch einem mit dem COP der Kompressions-Kältemaschine korrelierenden Bruchteil/Vielfachen der erzeugten Kälte. Mit der eingesparten Elektroenergie werden auch die eventuell damit verbundenen Umweltbeeinflussungen vermieden.

Absorptions-Kältemaschinen mit dem Stoffsystem Ammoniak/Wasser eignen sich zur Kälteerzeugung bis -70 °C. Damit können Kühl-/Gefrierräume oder -häuser ebenso mit Kälte versorgt werden wie technische Prozesse.

Absorptions-Kältemaschinen mit dem Stoffsystem Wasser/Lithiumbromid und Adsorptions-Kältemaschinen können aufgrund der Eigenschaften des Kältemittels Wasser nur Kälte bei Temperaturen von 3 °C aufwärts erzeugen (sog. Klimakälte). Damit wird i. d. R. die Klimatisierung von Büro-, Werk- oder Wohnräumen dezentral oder durch zentrale Kältemaschinen über sog. Kaltwassersysteme (Vorlauftemperatur des Kälteträgers meist 6 bis 12 °C) realisiert.

Die Effizienz von Absorptions- bzw. Adsorptions-Kältemaschinen wird durch ein Wärmeverhältnis angegeben, welches Nutzen – die Kälteleistung des Verdampfers – und Aufwand – der Heizwärmestrom des Austreibers – ins Verhältnis setzt:

Formel A.3-8

$$\text{Wärmeverhältnis} = \frac{\text{Verdampferwärmestrom}}{\text{Austreiberwärmestrom}} \rightarrow [\text{Wärmeverhältnis}] = 1 \frac{kW_{th}}{kW_{th}}$$

Wärmeverhältnisse von Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen sind meist deutlich kleiner als Eins, typisch sind Werte von 0,6 – 0,7. Auch hier bietet sich zur Berücksichtigung unterschiedlicher Lastzustände und damit variabler Wärmeverhältnisse über ein Jahr die Angabe einer Jahresarbeitszahl an.

#### **A.3.2.5 Rückkühlsysteme**

Rückkühlsysteme kommen dann zum Einsatz, wenn Abwärme aus einem Prozess abgeführt werden muss und dabei nicht genutzt (zurückgewonnen) werden kann. Dabei handelt es sich meist um Niedertemperatur-Abwärme, z. B. aus Kondensations-Kraftwerken oder thermischen Prozessen in Industrie und Gewerbe. Wenn die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung/Abwärmenutzung ausgeschöpft sind, muss die Abwärme an die Umgebung abgegeben werden, z. B. an die Atmosphäre oder fließende bzw. stehende Gewässer. Ziel ist die Rückkühlung des Abwärme-Trägermediums in den Bereich der Umgebungstemperatur.

Unter dem Aspekt der Energieeffizienz sollte der Hilfsenergieeinsatz bei Rückkühlsystemen minimiert werden. Oft ist das von Rückkühlsystemen zu erreichende Temperaturniveau aber auch ein Einflussfaktor hinsichtlich der Energieeffizienz oder der Prozessqualität der vorgeschalteten prozesstechnischen Systeme. Beispielsweise führt eine niedrigere Kondensationstemperatur in Dampfkraftprozessen zu höheren Wirkungsgraden des Dampfturbinenprozesses.

Daher ist die Auslegung von Rückkühlsystemen oft eine ökologische und ökonomische Optimierungsaufgabe, die qualifiziertes fachplanerisches Wissen erfordert.

Je nach erforderlicher thermischer Leistung und Temperaturniveau können auch komplexere Rückkühlsysteme erforderlich sein. Im BVT-Merkblatt „Industrielle Kühlsysteme“ sind diese Technologien detaillierter beschrieben.

Wesentlich für einen langfristigen energieeffizienten Betrieb von Rückkühlsystemen ist die regelmäßige Reinigung der Wärmeübertrager, insbesondere an der Übergabeseite zur Umgebung. Reinigungs-/Wartungsintervalle sind anhand der speziellen Betriebserfahrungen des jeweiligen Rückkühlsystems festzulegen. Beste verfügbare Technik bedeutet in diesem Zusammenhang, die Kühlleistung und das Temperaturniveau der Systeme kontinuierlich zu überwachen und bedarfsorientiert Reinigungsmaßnahmen durchzuführen.

#### **A.3.3 Angaben zu Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens**

Wärmerückgewinnungs- und Rückkühlsysteme stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Entstehung von Abwärme in industriellen Prozessen.



Sofern an einer geplanten industriellen Anlage signifikante Abwärmemengen zu erwarten sind, sollte im Rahmen eines Antragsverfahrens eine Systembetrachtung im Sinne von Kapitel A.3.1.3 dieses Dokumentes durchgeführt werden.

Kapitel A.3.1.2 dieses Dokumentes enthält Anhaltspunkte, bei welchen Energiemengen und Temperaturen des Abwärmeanfalls die Anwendung technischer Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung zumindest Gegenstand einer fachlichen Prüfung sein sollte.

## A.4 Elektromotorische Antriebe

### A.4.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Elektromotorische Antriebe

#### A.4.1.1 Anwendungsbereich elektromotorischer Antriebe und einsatzbestimmende Eigenschaften

Ein elektrischer Antrieb wandelt mit Hilfe eines Elektromotors elektrische in mechanische Energie um, die dem Antrieb einer Maschine dient. Im engeren Sinne definiert sich nach DIN EN 61800-9-2 (28) ein elektrisches Antriebssystem (Power Drive System, PDS) als Kombination aus Elektromotor und einem vollständigem Antriebsmodul (Complete Drive Module, CDM). Dieses Antriebsmodul kann z.B. ein Frequenzumformer (FU) sein, der mit allen Schutz- und Hilfseinrichtungen ausgestattet ist. Wird ein Elektromotor ohne Antriebsmodul direkt am Netz betrieben, muss dieser mit einem Motorstarter ausgerüstet werden und wird dann als „Motorsystem“ bezeichnet. Ein elektrisches Antriebssystem kann analog als „Motorsystem“ bezeichnet werden.

Bezieht man die angetriebene Maschine („Lastmaschine“), z. B. eine Zentrifugalpumpe, und ggf. vorhandene mechanische Kraftübertragungselemente (Getriebe) noch mit in den Betrachtungsrahmen ein, wird von einem „von Elektromotoren angetriebenem System“ bzw. einem erweiterten Produkt gesprochen (z. B. Pumpe, Druckluftkompressor etc.). In den meisten industriellen Anwendungen wird die mechanische Arbeitsleistung über eine rotierende Welle auf die angetriebene Maschine übertragen. Elektromotoren sind die am häufigsten verwendeten Antriebsmaschinen im industriellen Einsatz und dienen u. a. dem Betrieb von Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Mischer, Förderanlagen, Entrindungs-trommeln, Schleifgeräten, Sägen, Extruder, Zentrifugen, Pressen, Walzwerke etc..

Elektromotoren bilden weltweit die größte Gruppe an Stromverbrauchern. Schätzungen besagen, dass Motoren zwischen 43 % und 46 % des gesamten globalen Stromverbrauchs ausmachen. In der Industrie sind es sogar 69 % des genutzten Stroms (29). Prinzipiell ist hierbei zwischen drehzahlkonstanten und drehzahlgeregelten Antrieben zu unterscheiden.

Der Stromverbrauch der elektromotorisch angetriebenen Systeme wird durch viele Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel durch:

- ▶ Effizienz und angemessene Leistungsgröße der Motoren,
- ▶ Art der Motorsteuerung/des Antriebsmoduls (CDM),
- ▶ Qualität der Energieversorgung,
- ▶ Effizienz des mechanischen Getriebes,
- ▶ Praktiken der Instandhaltung,
- ▶ Effizienz der angetriebenen Maschine.

Es bestehen mindestens zwei verschiedene Herangehensweisen, um von Elektromotoren angetriebene Systeme energieeffizient zu gestalten und zu optimieren:

1. Einzelbetrachtung: Die Bestandteile des elektromotorisch angetriebenen Systems werden einzeln betrachtet. Es wird sichergestellt, dass nur Ausrüstungen mit hoher Effizienz eingesetzt werden.
2. Systembetrachtung: Um die Energieeffizienz des Gesamtsystems einschätzen und optimal gestalten zu können, gilt es den Bedarf des (Produktions-)Prozesses, die Fahrweise des Systems, die Effizienz und das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten des Gesamtsystems zu analysieren und aufeinander abzustimmen.

Anmerkung zur inhaltlichen Abgrenzung des Themengebietes und zur Darstellung im Rahmen des BVT-Merkblattes und den Vollzugshinweisen:

Elektromotoren sind auch integrierter Bestandteil komplexer technischer Systeme, die eigenständig als Querschnittstechnologien bezeichnet werden, insbesondere Pumpen, Ventilatoren und Drucklufterzeugungsanlagen (Kompressoren). Deshalb bestehen teilweise inhaltliche Überschneidungen zu den diese Technologien beschreibenden Dokumenten. Soweit für das unmittelbare Verständnis zweckmäßig, werden diese Überschneidungen in den jeweiligen Kapiteln bewusst beibehalten. Teilweise wird in bei der Darstellung der Antriebskomponente der jeweiligen Querschnittstechnologien auch auf die hier nachfolgenden speziellen Darstellungen zu elektromotorischen Antrieben verwiesen.

Eine normative Herangehensweise, die das elektrische Antriebssystem umfassender berücksichtigt, als dies eine getrennte Bilanzierung der Systemkomponenten ermöglicht, beschreibt die Norm DIN EN 61800-9-2:2018-01 (28). In dieser Norm wird zusätzlich zu der IE-Klassifizierung von Elektromotoren (30 S. 9) der Frequenzumrichter (Complete-Drive-Module, CDM) sowohl getrennt als auch in Kombination mit dem Elektromotor als Antriebssystem (Power Drive System, PDS) bilanziert. Für die getrennte Betrachtung des Frequenzumrichters sind folgende Effizienzklassen definiert:

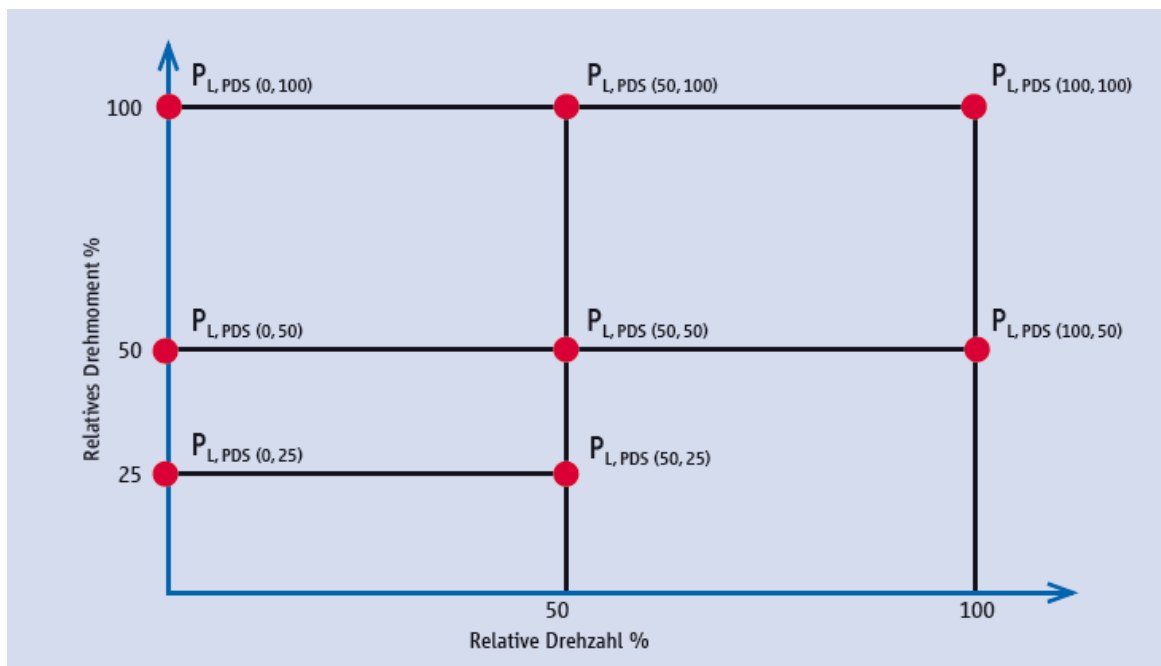
- ▶ IE0: mindestens 25 % höhere Verluste als Referenz,
- ▶ **IE1 (technischer Standard) = Referenz,**
- ▶ IE2: mindestens 25 % geringere Verluste als Referenz.

Die Kombination aus Elektromotor und Frequenzumrichter (Power Drive System) wird durch die Effizienzklassen IES (International Efficiency of System) beschrieben. Dabei bildet die Klasse IES1 wiederum das Referenzsystem ab:

- ▶ IES0: mindestens 20 % höhere Verluste als Referenz,
- ▶ **IES1 (technischer Standard) = Referenz,**
- ▶ IES2: mindestens 20 % geringere Verluste als Referenz.

Das Besondere dieser Norm ist die Beurteilung des gesamten Antriebssystems (PDS) in charakteristischen Teillastbereichen. Das Antriebssystem wird dabei in acht verschiedenen, praxistypischen Betriebspunkten getestet und in Bezug auf ein definiertes Referenzsystem über die IES-Klassen bewertet. Die Test-Referenzpunkte für die ermittelte Verlustleistung  $P_L$  des Gesamtsystems (PDS) werden dabei durch die Werte für die relative Drehzahl (Bezug: 100 % = Nenndrehzahl) und das relative Drehmoment (Bezug: 100 % = Nenndrehmoment) spezifiziert, die in dieser Reihenfolge in Klammern angegeben sind, siehe nachfolgende Abbildung A.4-1:

Abbildung A.4-1: Drehmoment-über-Drehzahl-Kennlinienfeld mit Referenzpunkten für die elektrische Verlustleistung nach DIN EN 61800-9-2



Quelle: (31)

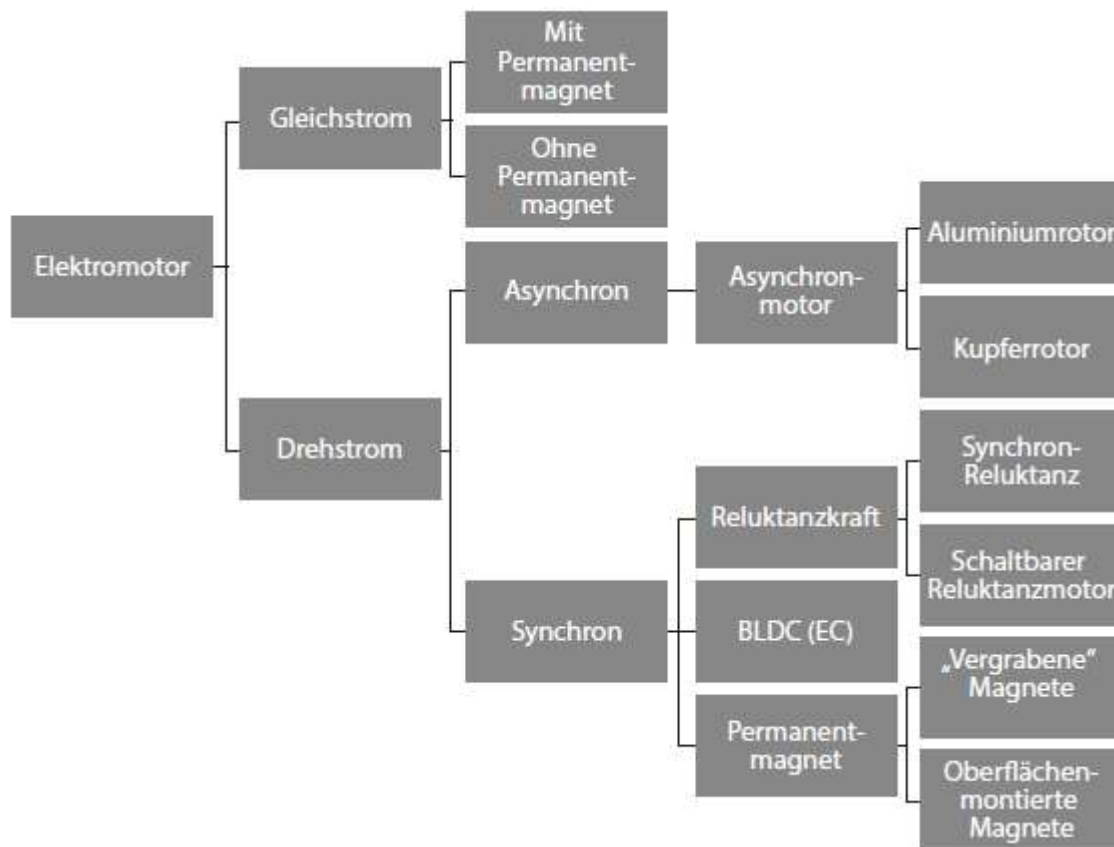
Lasten mit einer quadratischen Drehzahl-/Drehmomentkennlinie (z. B. übliche Pumpen-aggregate) können über die Betriebspunkte  $P_{L, PSD(50,25)}$ ,  $P_{L, PSD(100,50)}$  und  $P_{L, PSD(100,100)}$  hinreichend für Ihren Anwendungsbereich charakterisiert werden (28). Lasten mit konstantem Drehmoment (z. B. Hebeeinrichtungen) benötigen zusätzlich die Punkte  $P_{L, PSD(0,25)}$ ,  $P_{L, PSD(0,50)}$  und  $P_{L, PSD(0,100)}$  (ebd.), damit die Motorverluste bestimmt werden können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Komponenten eines elektrischen Antriebs, beginnend mit der Hauptkomponente - dem Elektromotor - kurz beschrieben. Die rotierenden Arbeitsmaschinen werden nicht dargestellt, da diese bereits Gegenstand eigenständiger Einzelkapitel im Hauptbericht zur Aktualisierung des BVT-Merkblattes "Energy Efficiency" sind.

### Elektromotoren

Elektromotoren können in zwei Hauptgruppen aufgeteilt werden: Gleichstrommotoren (DC-Motoren) und Wechselstrommotoren (AC-Motoren). Wechselstrommotoren unterscheiden sich wiederum in einphasig betriebene Motoren (kleine Baugrößen, auch als Wechselstrommotoren bezeichnet) und Drehstrommotoren. Aufgrund der geringen Leistungsgrößen von Wechselstrommotoren werden diese in vorliegendem Dokument nicht weiter betrachtet. In der Industrie finden sowohl Gleichstrom- als auch Wechselstrommotoren Anwendung, wobei Drehstrommotoren anzahlmäßig deutlich dominierend. Nachfolgend ist eine grobe Systematik praxisüblicher Motorenbauarten dargestellt (Abbildung A.4-2):

Abbildung A.4-2: Vereinfachte Übersicht praxisüblicher Motorbauarten



Quelle: (32)

***Drehstrommotoren*****Asynchronmotoren**

Drehstrom-Asynchron- oder Drehstrom-Induktionsmotoren sind die am häufigsten eingesetzten elektrischen Antriebsmaschinen. Diese sind sehr robust in der Bauart, einfach auszulegen, relativ preisgünstig in der Anschaffung und stellen geringe Anforderungen an die Instandhaltung. In Gehäuse dieses Motors befindet sich der Stator, ein Blechpaket mit der darin eingelegten Mehrphasenwicklungen (auch als Ständer bezeichnet). Innerhalb des Stators befindet sich als bewegliches Element ein Rotor (Läufer). Dieser besteht bei den üblicherweise verwendeten Kurzschluss- oder Käfigläufern aus massiven, gut leitfähige Stäben, die an beiden Enden des Rotors ringförmig kurzgeschlossen sind. Der Stromfluss durch die Ständerwicklungen baut ein Magnetfeld auf, welches aufgrund des Drehstroms kreisförmig wandert. Dieses Magnetfeld induziert eine Spannung im Rotor, die einen Stromfluss zur Folge hat und ebenfalls ein Magnetfeld aufbaut. Das Ständerfeld kann nun auf das Läuferfeld wirken und ein Drehmoment auf den Läufer ausüben. Somit muss der Läufer nicht an eine Spannungsversorgung angebunden sein, um ein wirksames Magnetfeld aufzubauen. Da ein wirksames Drehmoment nur dann aufrechterhalten werden kann, wenn die Drehfrequenz beider Magnetfelder leicht unterschiedlich ist, stellt sich eine leicht geringere Drehfrequenz des Rotors im Vergleich zur Frequenz des Drehfeldes des Stators, der Motor läuft als asynchron (unsynchron). Vorteil von Asynchronmotoren ist deren Möglichkeit, direkt am Netz gestartet und betrieben zu werden. Konstruktionsbedingt weist dieser Bauart beim Direktstart jedoch nur ein geringes Drehmoment und einen hohen Anlaufstrom auf. Bei direktem Netzbetrieb können Drehstrom-Asynchronmaschinen nur mit konstanter Drehzahl betrieben werden, die lastabhängig geringfügig schwankt. Variable Drehzahlen können nur durch Sonderbauformen (polumschaltbare Ausführung) oder durch zusätzliche Antriebsmodule (Frequenzumrichter) realisiert werden.

Drehstrom-Induktions-motoren sind für Leistungsgrößen zwischen wenigen 100 W bis zu mehreren 100 Megawatt erhältlich.

### **Synchronmotoren**

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Drehstrom-Asynchronmotoren sind Synchron-motoren dadurch gekennzeichnet, dass der Läufer (Rotor) synchron mit der Frequenz des Drehfeldes des Stator läuft. Drei wesentliche Bauarten sind hierbei zu unterscheiden:

- ▶ EC-Motoren (EC = Electronically Commutated Motor - elektronisch kommutierter Motor) bzw. synonyme Bezeichnung BLDC- Motoren (BLDC = Brushless Direct Current Motor - bürstenloser Gleichstrommotor),
- ▶ Reluktanzmotoren,
- ▶ Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotoren.

### **EC-Motoren/BLDC-Motoren**

EC-Motoren/BLDC-Motoren sind entgegen ihrer Namensgebung keine Gleichstrommotoren, sondern im Aufbau einem Synchronmotor mit Permanentmagnet-Rotor vergleichbar. Die oft dreisträngige Drehstromwicklung des Stators wird durch eine geeignete Schaltung (elektronische Kommutierung) so angesteuert, dass sie ein drehendes magnetisches Feld erzeugt, welches den permanent erregten Rotor mitzieht. Typische Baugrößen von EC-Motoren reichen von wenigen Watt bis zu ca. 10 kW. Eine häufige Anwendung von EC-Motoren sind Ventilatoren. Besonders in kleinen Leistungsbereichen in einphasiger Ausführung sind EC-Motoren herkömmlichen Motorbauformen wie Universal- oder Spaltpolmotoren (hier nicht näher erläutert) im Hinblick auf deren Wirkungsgrad deutlich überlegen, auch in größeren Leistungsbereichen werden mit EC-Motoren gute Wirkungsgrade erreicht und ermöglichen eine drehzahlvariable Fahrweise.

### **Reluktanzmotoren**

Reluktanzmotoren unterscheiden sich von Induktions- und Synchronmotoren mit Permanentmagnet durch deren physikalisches Prinzip der Drehmomenterzeugung. Im Gegensatz zur sogenannten Lorenz-Kraft, die eine Ladung in einem magnetischen oder elektrischen Feld erfährt (Wirkprinzip der Induktions- und Synchronmotoren) wirkt bei Reluktanzmotoren die sogenannte Reluktanzkraft. Diese entsteht aufgrund der Änderung des magnetischen Widerstands im Rotor. Dieser besitzt in einer Richtung einen möglichst geringen Widerstand und rechtwinklig dazu eine hohe magnetische Reluktanz (d. h. eine gute magnetische „Isolation“). Das Drehmoment entsteht dadurch, dass der Rotor versucht, die magnetisch leitfähige Richtung am Statorfeld auszurichten. Der Aufbau eines Synchron-Reluktanzmotors ist im Stator identisch mit dem eines herkömmlichen Induktionsmotors. Der Unterschied besteht im Aufbau des Rotors. Dieser ist unerregt, besitzt keine Wicklungen oder Permanentmagneten, sondern besteht aus einem massiven oder geblechten Metall mit einer möglichst ausgeprägten magnetischer Vorzugsrichtung (z. B. Elektrobleche mit Luftsperrern, siehe nachfolgende Abbildung A.4-3).

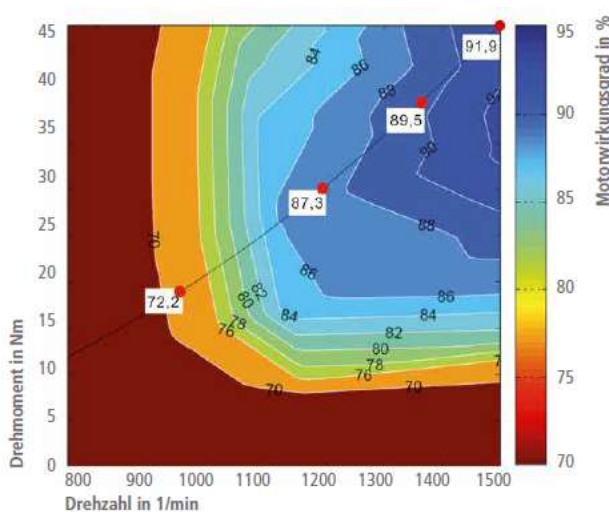
Abbildung A.4-3: Schnitt durch den Rotor eines Synchron-Reluktanzmotors



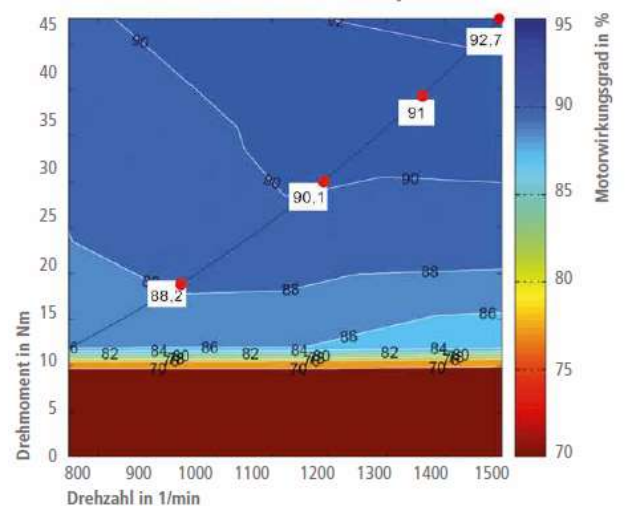
Quelle: (33)

Zum Anfahren ist beim Synchron-Reluktanzmotor ein Frequenzumrichter (FU) notwendig. Großer Vorteil dieser Technologie sind die kaum vorhandenen Läuferverluste im Betrieb, die bei Asynchronmotoren etwa 25 – 30 % der Gesamtverluste ausmachen. Dementsprechend lassen sich sehr hohe Wirkungsgrade (insbesondere im Teillastbetrieb) erreichen. Hierdurch kommt es zu einer geringeren Erwärmung im Rotor, was sich vorteilhaft auf die Widerstandsfähigkeit von Lagern und Wicklungsisolationen auswirkt. Einen beispielhaften Vergleich des Wirkungsgradverhaltens eines 7,5 kW IE4 Synchron-Reluktanzmotors und eines leistungsgleichen IE3-Asynchronmotors bei Betrieb am Frequenzumrichter unter Nenn- und Teillastbedingungen ist in Abbildung A.4-4 dargestellt.

Abbildung A.4-4: Beispielhafter Vergleich der elektrischer Wirkungsgrade zweier 7,5 kW Drehstrommotoren unterschiedlicher Bauart unter Teillastbedingungen



7,5 kW Asynchronmotor IE3 am FU



7,5 kW Synchron-Reluktanzmotor IE4 mit integriertem FU

Quelle: (34)



Geschaltete Reluktanzmotoren sind ähnlich aufgebaut, die Rotoren haben aber eine ausgeprägte Zahnstruktur und die Statoren konzentrierte Wicklungen (Pole). Für den Betrieb dieser Motoren ist eine besondere elektronische Regelung notwendig, die dafür sorgt, dass die Statorwicklungen auf eine besondere Weise mit Spannung versorgt werden und die Statorpole damit rotierend entsprechende Magnetfelder aufbauen. Die Pole (Zähne) des Rotors folgend über die wirkenden Reluktanzkräfte dieser Bewegung und generieren damit ein Drehmoment. Geschaltete Reluktanzmotoren lassen sich aus diesem Grund auch nicht direkt am Netz betreiben.

#### Synchronmotoren mit Permanentmagnet-Rotoren

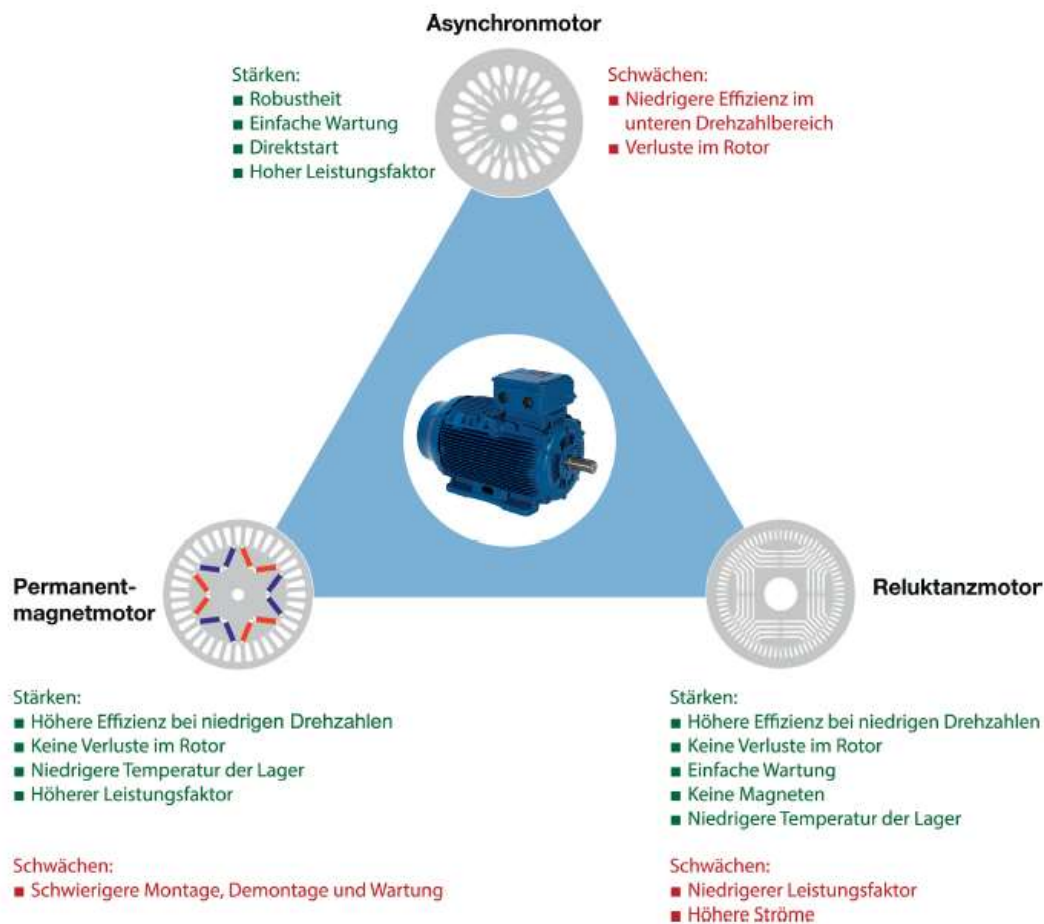
Ähnlich hohe Wirkungsgrade wie Synchron-Reluktanzmotoren erreichen Synchron-Motoren mit Permanentmagnet-Rotoren. Diese benötigen analog einen Frequenzumrichter, um am Netz betrieben werden zu können. Aufgrund der Verwendung von Permanent-Magneten auf Basis seltener Erden sind diese teurer als äquivalente Baugrößen anderer Drehstrommotoren.

Eine besondere Bauart sind der sogenannte LSPM-Motor (Line Start Permanent Magnet Motor). Dieser Motor ist konstruktiv ein Drehstrom-Asynchronmotor, der im Kurzschlussläufer zusätzlich Permanentmagnete enthält. Der Motor kann auch ohne Frequenzumrichter direkt am Netz betrieben werden. Nach einem asynchronen Anlauf synchronisiert sich der Motor auf die Speisefrequenz und läuft anschließend im Synchronbetrieb. Hierdurch treten im Betrieb keine Rotorverluste auf und es können hohe Wirkungsgrade realisiert werden.

Nachfolgende Abbildung stellt grundlegende Vor- und Nachteile verschiedener Bauarten von Drehstrommotoren zusammenfassen gegenüber, mit denen nach Stand der Technik eine hohe Energieeffizienz erreicht werden kann (Abbildung A.4-5):



Abbildung A.4-5: Vor- und Nachteile energieeffizienter Bauarten von Drehstrommotoren



Quelle: (35)

### Gleichstrommotoren

Die Statoren von Gleichstrommotoren sind entweder als Permanentmagnete ausgeführt oder werden durch eine Erregerwicklung magnetisiert. Das wesentliche Merkmal von Gleichstrommotoren ist ein am Rotor installierter mechanischer Wechselrichter, der als Kommutator oder auch Polwender bezeichnet wird. Mit dessen Hilfe wird im Motorbetrieb im Rotor ein drehzahlabhängiger Wechselstrom erzeugt.

Der große Vorteil von Gleichstrommotoren war über lange Zeit deren einfache Möglichkeit einer Drehzahl Anpassung. Außerdem verfügen sie über ein hohes Anlaufdrehmoment und können unter Last anlaufen, was in einigen Anwendungen von Vorteil ist. Die schnelle Entwicklung der Leistungselektronik mit den Möglichkeiten einer Drehzahlregelung für Drehstrommotoren hat jedoch die Stellung der Drehstrommotoren deutlich verbessert, so dass es keine wesentlichen Vorteile der Gleichstromtechnologie gegenüber den Drehstromantrieben gibt mehr. Da es jedoch weitere Anwendungen gibt, die eine präzise Drehzahl- und Drehmomentsteuerung erfordern wie beispielsweise Antriebe von Werkzeugmaschinen, ist entsprechende Antriebstechnik weiter im Einsatz.

### Steuerelemente

In seiner einfachsten Form ist dies ein Schalter oder Kontaktgeber, um den Motor an das Stromnetz anzuschließen oder davon abzuschalten. Er kann manuell oder ferngesteuert mit Hilfe einer Steuerspannung geschaltet werden. In diese Elemente können Funktionen des Motorschutzes

aufgenommen werden. Zur Vermeidung hoher Anlaufströme beim Anfahren eines Drehstrom-Motors kann dieser über eine Stern-Dreieck-Schaltung (Schützschtaltung oder Stern-Dreieck-Schalter) erfolgen. Eine fortschrittlichere Methode für den Anschluss eines Motors an das Stromnetz ist ein 'Sanftstarter'. Dieses elektronische Bauelement ermöglicht ein langsames Anfahren eines Drehstrommotors, reduziert dabei den Einschaltstromstoß und schützt damit Mechanik und Sicherungen. Ohne eine 'Sanftstart'-Eigenschaft oder einen Stern-Dreieck-Anlauf startet der Motor und beschleunigt heftig bis zu seiner Nenndrehzahl. Echte Motorsteuerelemente sind in der Lage, die Leistung (Drehzahl und Drehmoment) von Elektromotoren zu beeinflussen und ermöglichen gleichzeitig einen Sanftanlauf. Das am häufigsten in der Industrie angewandte Funktionsprinzip ist die Frequenzumrichtung. Dabei wird die Netzfrequenz (in Europa: 50 Hz) in eine andere Frequenz umgewandelt, um die Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors zu ändern. Synonyme Begriffe für den Frequenzumrichter (FU) sind Motor-Wechselrichter oder einfach Wechselrichter.

### ***Mechanisches Getriebe***

Das mechanische Getriebe verbindet die angetriebene Maschine und den Motor miteinander. Dies kann eine einfache starre Kupplung, ein Getriebe, ein Ketten- oder Riemenantrieb oder eine hydraulische Kupplung sein, welches die Enden der Maschinenwellen und einen Motor miteinander verbindet. Fast alle dieser Typen weisen zusätzliche Energieverluste im Antriebssystem auf. Die Effizienz eines Übersetzungs-getriebes ist im Vergleich zum Keilriemen höher.

#### ***A.4.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes elektrischer Antriebe und Motoren im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes***

##### ***A.4.1.2.1 Systembetrachtung***

Eine isolierte Betrachtung des Wirkungsgrades von Elektromotoren bzw. der anderen Komponenten des Antriebssystems ist keine ausreichende Methode zur Bewertung der Energieeffizienz elektromotorisch angetriebener Systeme. Grundsätzlich sollten Elektromotoren als Bestandteil eines technischen Gesamtsystems bewertet werden, welches in der Regel aus Elektromotor, Steuerungsgerät, Getriebe und einer angetriebenen Maschine (z. B. Förderanlage, Werkzeugmaschine o. ä.) besteht. Damit sind für elektromotorisch angetriebene Systeme möglichst die jeweils technologiespezifischen Randbedingungen zu beachten. Wichtig ist auch die Kenntnis der Einsatzdauer sowie der üblichen Lastbedingungen, für die ein elektromotorisch angetriebenes System ausgelegt ist.

Besonders häufige Kombinationen von elektromotorischen Antrieben und speziellen Arbeitsmaschinen stellen die Anwendungsbereiche

- ▶ Druckluftherzeugungsanlagen (Kompressoren),
- ▶ Pumpen,
- ▶ Ventilatoren

dar. In Summe entfallen mehr als die Hälfte des industriellen Elektroenergieverbrauches allein auf diese drei Anwendungsbereiche. In der Praxis sind diese Systemkombinationen außerdem häufig durch eine weitgehende Integration des Motors in eine kompakte Maschine gekennzeichnet, die ausschließlich als komplette Baugruppe bzw. Funktionseinheit am Markt verfügbar ist. Daher wurden für diese typischen Systeme eigene Effizienzmaßstäbe entwickelt, welche die Systemgrenze zur Bewertung auf die Funktion der angetriebenen Arbeitsmaschine erweitern. Dementsprechend werden diese drei Anwendungsbereiche jeweils als selbstständige Querschnittstechnologie betrachtet (siehe Kapitel 3.7 – 3.9 des BVT-Merkblattes bzw. Pkt. A.5 – A. 7 der vorliegenden Vollzugsanweisung).

#### A.4.1.2.2 Bagatellschwellenprüfung

Sofern Elektromotoren als Bestandteil der unter Kapitel A.4.1.2.1 benannten Funktionseinheiten Pumpen, Druckluftkompressoren bzw. Ventilatoren eingesetzt werden, sind sie nicht nochmals zu bewerten. D. h., bei der Bestimmung der voraussichtlich auf elektromotorische Antriebe entfallenden Energieverbräuche sind die o. g. speziellen Querschnittstechnologien herauszurechnen, deren Bewertung ist nach den jeweiligen technologiespezifischen Kriterien vorzunehmen.

Eine spezielle Betrachtung von Energieeffizienzaspekten der sonstigen elektromotorischen Antriebe ist im Rahmen von Genehmigungsverfahren in der Regel nicht erforderlich, wenn der voraussichtliche Elektroenergiebezug für die dafür geplanten Motoren in Summe < 10.000 kWh/a beträgt. Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

#### A.4.2 Angaben zu elektrische Antrieben und Motoren im Rahmen eines Antragsverfahrens

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen verfügt der Vorhabenträger häufig noch nicht über Detaildaten zur Auslegung und der Ausführung einzelner Geräte und Anlagen. In der Regel werden von den Vorhabenträgern Detailplanungen und Bestellvorgänge, in deren Rahmen solche Daten festgelegt oder von Lieferanten verbindlich angegeben werden, erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sollten diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabenträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar sein. Folgende Angaben des Vorhabenträgers erleichtern die Bewertung der Energieeffizienz durch Elektromotoren angetriebener Systeme:

- ▶ mittlere jährliche Nutzungsdauer (Betriebsstunden pro Jahr),
- ▶ typisches Lastverhalten (Vollastbetrieb bei Nennlast, Teillastbetrieb, ggf. Leerlauf- oder Anlaufzustände; wenn möglich: Angabe eines typisierten Lastverhaltens),
- ▶ Typ und Energieeffizienzklasse (IE/IES) des Elektromotors/des Motorsystems (letzteres, falls mit FU, dann möglichst für typische Betriebspunkte),
- ▶ Angaben zum Einsatz von Steuerungsgeräten (Frequenzumformer),
- ▶ Angabe zur Einsatz von Getriebeelementen,
- ▶ Wirkungsgrad des Gesamtsystems (inkl. Lastmaschine) im Nennpunkt bzw.
- ▶ Wirkungsgrad des Gesamtsystems (inkl. Lastmaschine) unter typischen Teillastbedingungen, sofern Teillastzustände für einen hohen Anteil der jährlichen Nutzungsdauer zu erwarten sind.

Mit einer Systembetrachtung lassen sich die vorhandenen Energieeinsparpotenziale besser ausschöpfen als ausschließlich durch Komponentenoptimierung. Aufgrund der Komplexität einer solchen Gesamtbetrachtung ist eine manuelle Berechnung jedoch meist aufwändig oder fast unmöglich. Daher kann es als beste verfügbare Technik für den Planungsprozess angesehen werden, spezielle Engineering-Software zur optimalen Auslegung eines Antriebssystems einzusetzen. Damit kann der Prozessbedarf detailliert ermittelt und die Energieeffizienz des kompletten Antriebssystems berechnet werden. Ebenfalls können Teillastwirkungsgrade und gegenseitige Einflüsse der Komponenten berücksichtigt und ein Energieeffizienzvergleich verschiedener Antriebskonzepte durchgeführt werden.

##### A.4.2.1 Energieeffiziente Elektromotoren

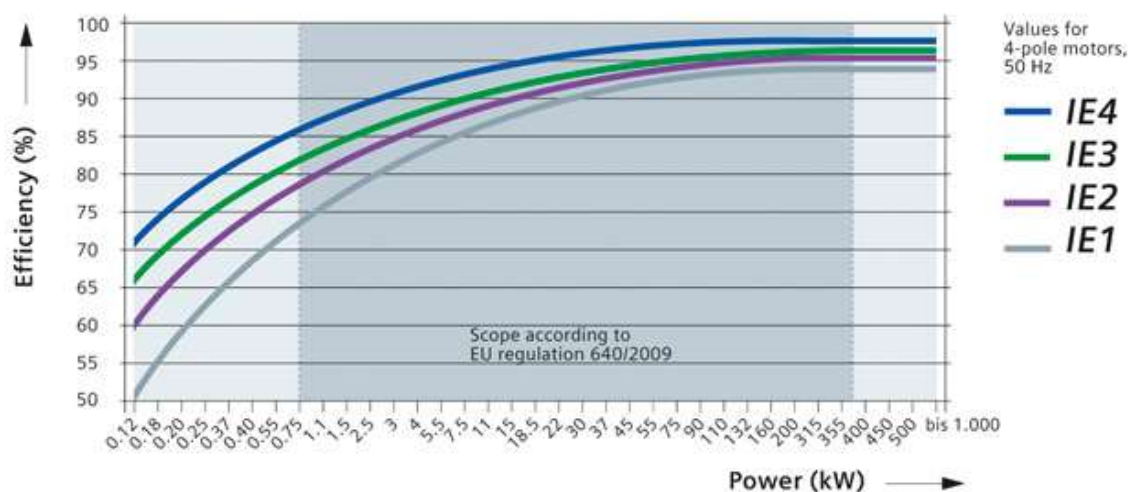
Netzgespeiste Drehstrommotoren werden seit Veröffentlichung der Norm DIN EN 60034-30-1:2014-12 im Dezember 2014 entsprechend ihres elektrischen Wirkungsgrades im Nennpunkt in die Effizienzklassen IE1 - IE4 eingeteilt (30). Sie gilt für einen Leistungsbereich von 0,12 bis 1.000 kW. Die Leistungsangabe bezieht sich dabei auf die mechanische Wellenleistung des Motors. Begleitend zur

Einführung dieser Wirkungsgradklassifikation erfolgte auch eine Anpassung der Normenwerke zur messtechnischen Bestimmung des Motorwirkungsgrades. Mit der Veröffentlichung der Norm DIN VDE 5030-30-2:2019-02 im Februar 2019 (36) gelten nunmehr die Wirkungsgradklassifikationen auch für Bauarten von Wechselstrommotoren, die mit variabler Drehzahl am Frequenzumrichter betrieben werden (z. B. Synchron-Reluktanzmotoren). Es gelten somit folgende Effizienzklassen für die praxisüblichsten Motorbaugrößen:

- ▶ IE1 Standard Effizienz,
- ▶ IE2 Hohe Effizienz,
- ▶ IE3 Premium Effizienz,
- ▶ IE4 Super Premium Effizienz,
- ▶ IE5 Ultra Premium Effizienz (derzeit nur für Motoren definiert, die mit variabler Drehzahl betrieben werden und über die DIN VDE 5030-30-2:2019 erfasst sind).

Nachfolgend sind beispielhafte Wirkungsgrade für 4-polige, netzbetriebene Asynchronmotoren mit den Effizienzklassen IE 1 - 4 dargestellt (Abbildung A.4-6):

Abbildung A.4-6: Wirkungsgrade netzbetriebener Asynchronmotoren unterschiedlicher Effizienzklassen am Beispiel eines 4-poligen Motors



Quelle: (37)

In der Verordnung Nr. 640/2009 der Europäischen Kommission (38) wurden verbindliche Ökodesign-Anforderungen für 2 - 6-polige, netzbetriebene Asynchronmotoren (< 1.000 V) im Leistungsbereich zwischen 0,75 und 375 kW definiert. Nicht erfasst sind Motoren entsprechend DIN VDE 5030-30-2:2019-02 (36), die nur mit Frequenzumrichter betrieben werden können (z. B. Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren) sowie 8-polige Asynchronmotoren. Stufenweise gelten u. a. folgende Anforderungen:

- ▶ Ab 1. Januar 2015 müssen Motoren mit einer Nennleistung zwischen 7,5 - 375 kW mindestens das Effizienzniveau IE3 erreichen oder dem Energieeffizienzniveau IE2 entsprechen und mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein.
- ▶ Ab 1. Januar 2017 gelten die genannten Anforderungen auch für Motoren mit einer Nennleistung zwischen 0,75 - 7,5 kW.

Ausgeschlossen von dieser Verordnung sind:

- ▶ Motoren, welche vollständig in Flüssigkeit betrieben werden,

- ▶ Motor, deren Effizienz einzeln nicht erfasst werden kann, da sie in ein Produkt vollständig integriert sind,
- ▶ Bremsmotoren mit einer elektromechanischen Bremsleistung,
- ▶ Motoren für extreme Einsatzbedingungen.

**Diese Anforderungen gelten für das Inverkehrbringen der Motoren, auch wenn sie in andere Produkte eingebaut sind.**

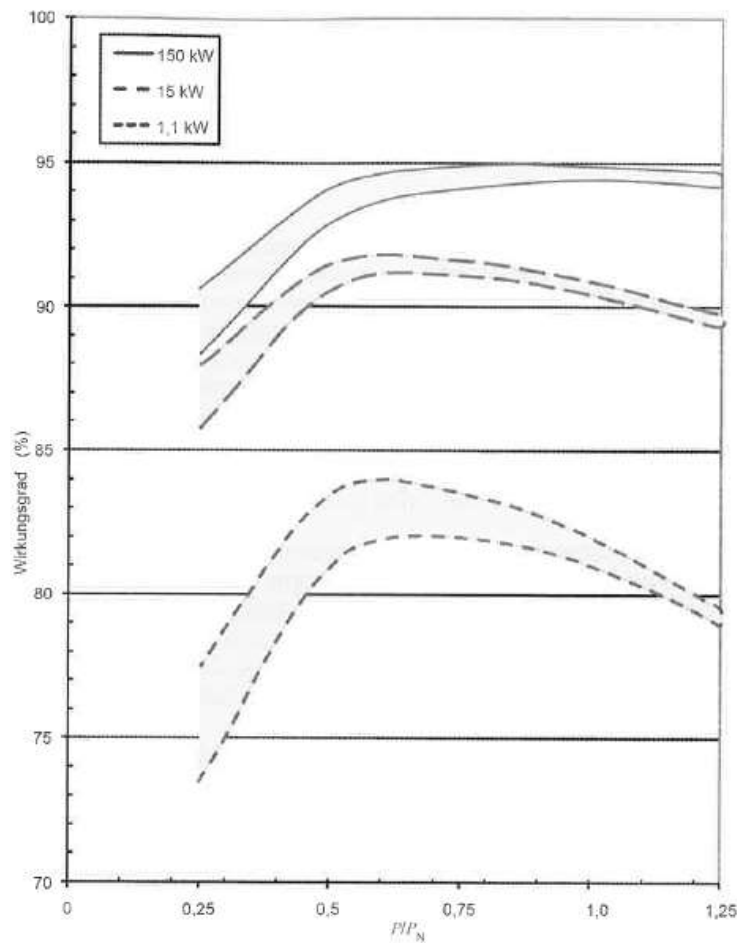
Elektromotoren, die diese Effizienzkriterien nicht erfüllen, dürfen noch eingesetzt und betrieben werden, wenn sie z. B. aus Lagerbeständen von Zwischenhändlern oder Systemlieferanten stammen und die zum Zeitpunkt des Inverkehrbringens jeweils gültigen Ökodesign-Anforderungen erfüllen.

**Beste verfügbare Technik sind derzeit Motoren, die die Mindestanforderungen der Ökodesign-Richtlinie (Verordnung Nr. 640/2009 der Europäischen Kommission) überschreiten. Für „klassische“ Drehstrom-Asynchronmotoren sind zahlreiche Produkte mit der Effizienzklasse IE4 marktverfügbar, für Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren, die am Frequenzumrichter betrieben werden müssen, sind Produkte mit dem Energieeffizienzniveau IE4 und sogar IE5 bereits in einigen Leistungsbereichen marktverfügbar. Energieeffiziente Produkte erfüllen mindestens die gesetzlichen Standards.**

#### **A.4.2.2 Auslegung und Bemessung von Motoren**

Bei der Auswahl und Bemessung elektrischer Motoren ist zu beachten, wie sich deren elektrische Wirkungsgrade unter verschiedenen Belastungssituationen darstellen. Nachfolgende Abbildung A.4-7 zeigt typische Wirkungsgradbelastungskurven für Asynchronmotoren verschiedener Leistungsbereiche. Es ist erkennbar, dass das Wirkungsgrad-optimum vor allem Elektromotoren kleinerer Leistung unterhalb des Nennpunktes liegt, meist in einem Bereich zwischen 60 – 90 % der Nennlast. Motoren größerer Leistungsklassen (hier: 150 kW) zeigen kein ausgeprägtes Optimum, sondern einen vergleichsweise weiten Lastbereich mit hoher Effizienz. Unterhalb von ca. 30 % Last arbeiten Elektromotoren nicht mehr unter optimalen Bedingungen.

Abbildung A.4-7: Typische Wirkungsgradbelastungskurven für Drehstrom-Induktionsmotoren mit Käfigläufer (Asynchronmotoren) verschiedener Leistungsbereiche



Quelle: (39)

Eine energetisch optimierte Bemessung von Elektromotoren sollte somit immer berücksichtigen, unter welchen Lastbedingungen das angetriebene System überwiegend betrieben werden soll. Dementsprechend sind insbesondere bei Motoren kleiner und mittlerer Leistung (hier beispielhaft 1,1 und 15 kW), die mit konstanter Drehzahl betrieben werden sollen, größere Leistungsreserven des Motors zulässig.

#### A.4.2.3 Antriebe mit variabler Drehzahl

Die Anpassung der Motordrehzahl mit Hilfe von Frequenzumrichtern kann zu bedeutenden Energieeinsparungen führen. Insbesondere für Anwendungen, bei denen Flüssigkeiten oder Gase in Rohrleitungen oder Kanälen mit variablen Massenströmen gefördert werden (Ventilatoren und Gebläse, Kreiselpumpen, Verdichter, Zentrifugen), lassen sich die größten Einsparungen erreichen. Bei diesen Anwendungen verhalten sich das Lastmoment proportional zum Quadrat und die mechanische Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl. Beispielhaft ergibt sich hier bei Halbierung der Drehzahl eine Reduzierung des mechanischen Leistungsbedarfs auf 1/8 der Nennleistung. Alternativ anzuwendende Drossel- oder Bypassschaltungen erreichen eine Durchflussregulierung nur mit geringfügig verringertem Leistungsbedarf. Auch bei anderen technologischen Aufgaben lassen sich durch bedarfsgerechte Anpassung der Motordrehzahl zum Teil deutliche Energieeinsparungen erreichen.



Weitere Effekte des Einsatzes von Frequenzumrichtern sind verbesserte Möglichkeiten der Prozesssteuerung (genaue Drehmoment- bzw. Drehzahleinstellung), ein geringerer Verschleiß mechanischen Komponenten und die Verringerung von Lärmemissionen.

Frequenzumrichter sind jedoch nicht für alle Anwendungen geeignet. Besonders bei konstanter Last (z. B. Wirbelschicht-Eingabeventilatoren, Kompressoren für Oxidationsluft) kommt es aufgrund der Eigen- und Zusatzverluste bei Betrieb des Frequenzumrichters zu einer Reduzierung des Gesamtsystemwirkungsgrades. Der Betrieb von Frequenzumrichtern erhöht die Motorverluste durch zusätzliche Oberschwingungen um ca. 15 - 25 % (28). Bei Nennlast des Motors weisen Frequenzumrichter je nach Leistungsgröße Wirkungsgrade zwischen 96 – 98 % auf: Die Verluste entsprechen in diesem Betriebspunkt folglich 2 - 4 % der zugeführten elektrischen Energie. Im Vorfeld des Einsatzes von Frequenzumrichtern sind somit immer die Lastanforderungen und Betriebsbedingungen der Motoren/angetriebenen Maschinen zu überprüfen und hieraus Schlussfolgerungen für den Einsatz dieser Steuergeräte zu ziehen.

Bei der Auswahl von Frequenzumrichtern bieten die mit der Norm DIN EN 61800-9-2:2018-01 (28) eingeführten Effizienzklassen IE0 - IE2 eine gute Bewertungsbasis. Für das gesamte elektrische Antriebssystem, bestehend aus Elektromotor und Frequenzumrichter, bietet die Klassifizierung nach IES0 - 2 eine gute Bewertungsbasis zur Stand der Technik.

#### **A.4.2.4    *Rückspeisung von Bremsenergie***

Anwendungen wie Zentrifugen, Walzen, Förderbänder und Hebeanwendungen verfügen über ein kinetisches Energiepotential, welches in häufigen Intervallen beschleunigt und gebremst wird. Um einen Antrieb zu bremsen, muss dem System Energie entzogen werden. Die einfachste Variante ist, die Energie über einen Bremswiderstand in Wärme umzuformen. Diese Wärmeenergie steht für den Betreiber anschließend nicht mehr zur Verfügung. Aus ökologischer Sicht ist es daher sinnvoll, mechanische Energie im Bremsvorgang in elektrische Energie umzuwandeln und zu speichern oder in das Netz rückzuspeisen. Die rückgewonnene Energie kann durch das Laden von Netzdrosseln, Kondensatoren oder interner Batterien für spätere Beschleunigungen der gleichen Maschine nutzbar gemacht oder für die elektrische Versorgung anderer Verbraucher unmittelbar in einem Zwischennetz verwendet werden (37). Alternativ kann der Strom auch in das Stromnetz eingespeist werden (37). In Einzelfällen kann ein Energieeinsparungspotenzial von bis zu 50 % (40) gegenüber einem rein widerstandsbasierten Bremssystem erreicht werden.

Eine Bremsenergieerückspeisung bietet keinen vollständigen Ersatz zum Bremswiderstand. Dieser muss als Sicherheitsoption im System weiterhin installiert sein. Für die Nutzung der Bremsenergie sind spezielle rückspeisefähige Umrichter notwendig. Diese sind auf dem Markt vorhanden, jedoch sind sie mit einem teilweise deutlichen Investitionsmehraufwand verbunden. Eine Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme muss daher im Detail überprüft werden.

#### **A.4.2.5    *Verluste bei der mechanischen Kraftübertragung***

Innerhalb eines betrachteten Gesamtsystems muss das durch den Elektromotor erzeugte Drehmoment auf die angetriebene Maschine übertragen werden. Bei dieser Übertragung kommt es teilweise zu bedeutenden Verlusten. Es kann demnach ratsam und ökonomisch sinnvoll sein, zuerst die Übertragung bzw. Kopplung beider Komponenten zu optimieren, um signifikante Effizienzsteigerungen zu erzielen. Die energieeffizienteste Lösung bietet hier eine direkte Kupplung. Im einfachsten Fall ist dies eine starre Welle, die beide Maschinen miteinander verbindet. Somit sind Drehzahl und Drehmoment gleich. Die benötigte Nutzdrehzahl kann dann mithilfe eines Frequenzumrichters vor dem Motor eingestellt werden.

Ist es aus unterschiedlichen Gründen (z. B. Änderung der Drehrichtung, Bewegungsart) nicht möglich, Motor und angetriebene Maschine direkt miteinander zu verbinden, müssen andere Übertragungssysteme montiert werden. Bauteile, die den Energiefluss bewusst reduzieren, wie zum



Beispiel Drosseln, Dämpfer oder ein Bypass, sind zu vermeiden. Grundsätzlich steigen die Übertragungsverluste mit der Anzahl der Übertragungsglieder und mit der Größe des Übersetzungsverhältnisses. Das Schneckengetriebe ist ein Beispiel für eine Übersetzung, bei der die Übertragungsverluste sehr hoch sein können.

Für Übertragungsaufgaben, die eine elastische Verbindung erfordern (z. B. zur Vermeidung von Vibrationen in der angetriebenen Maschine), wurden in der Vergangenheit häufig Keilriemengetriebe verwendet. Diese sind jedoch, besonders nach längerer Betriebszeit, stärker verlustbehaftet als andere Getriebearten. Der Wirkungsgrad eines Keilriemens liegt zwischen 85 und 98 %, die Energieverluste betragen demnach 2 - 15 %. Lassen die Systemparameter es zu, sollten Alternativen eingesetzt werden. Beispiele sind Flachriemengetriebe, wenn ein Schlupf möglich sein soll, und Zahnriemengetriebe, wenn ein Schlupf nicht zwingend notwendig ist, jeweils mit 95 - 99 % Wirkungsgrad (41).

#### **A.4.2.6 Reparatur und Neuwicklung von Elektromotoren**

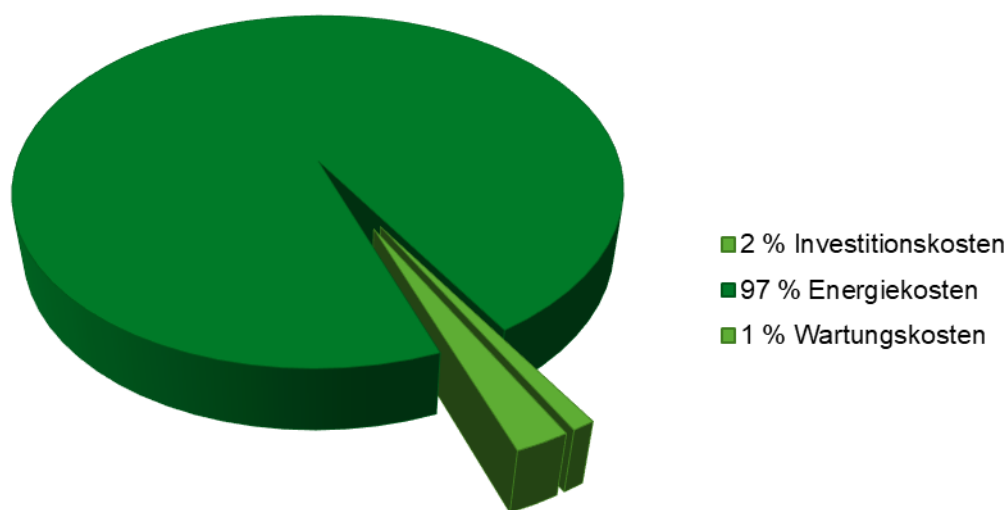
Erfahrungsgemäß lassen sich durch Reparatur oder Neuwicklung von Motoren keine Effizienzverbesserungen erreichen. In der Praxis kann sich durch solche Maßnahmen die Effizienz der Motoren im Vergleich zur Bestandssituation sogar verschlechtern. Nur bei sehr alten, großen Motoren sind ggf. Effizienzverbesserungen durch eine Neuwicklung aufgrund besserer Werkzeuge und Wicklungstechniken erreichbar.

In beiden Fällen empfiehlt es sich, die Mehrkosten eines neuen, energieeffizienten Motors den Kosten einer Reparatur oder Neuwicklung gegenüberzustellen und mit möglichen Energieeinsparungen über die (Rest-)Lebenszykluszeit zu vergleichen. Fällt ein Motor mit hoher Betriebsstundenzahl aus, ist es häufig wirtschaftlicher, einen neuen, hocheffizienten Motor zu erwerben, als den alten Motor reparieren zu lassen. Die Mehrkosten für die Neuanschaffung refinanzieren sich in der Regel in 0,5 bis 3 Jahren (37). Motorreparatur oder Neuwicklungen sind somit nicht als Energieoptimierungsmaßnahme anzusehen.

#### **A.4.2.7 Betrieb von Elektromotoren**

Die Lebenszykluskosten eines Elektromotors werden dominiert von dessen Energiekosten, wie nachfolgende Abbildung A.4-8 für eine Motoranwendung nach Stand der Technik beispielhaft zeigt, die im industriellen Umfeld typisch ist.

Abbildung A.4-8: Verteilung der Lebenszykluskosten eines 11 kW- IE3-Motors mit 4.000 Betriebsstunden/a über einen Betrachtungszeitraum von 15 Jahren



Quelle: (42)

Die Kosten für einen energieeffizienten Motor bester verfügbarer Technik liegen je nach Hersteller circa 20 % höher als für Motoren nach Stand der Technik. Für einen Motor der Effizienzklasse IE4 mit 11 kW bei unterstellten 4.000 Betriebsstunden/a und einem überschlägigen Strompreis von 15 Ct/kWh (43) würden sich die Mehrkosten gegenüber einer Ausführung nach Effizienzklasse IE3 in einem Zeitraum von ca. 2 - 3 Jahren über die erzielbaren Energiekosteneinsparungen amortisieren.

Bedingung für die kurze Amortisationszeit der Mehrkosten besonders energieeffizienter Motoren und Systeme ist ein möglichst konstanter Betrieb mit hoher Auslastung über den gesamten Betrachtungszeitraum.

#### A.4.2.8 Zusammenfassung

Nachfolgende Tabelle A.4-1 stellt wesentliche Maßnahmenansätze mit typischen Einspar-potenzialen im Überblick dar, die für elektromotorisch angetriebene Systeme gelten:

Tabelle A.4-1: Energiesparende Maßnahmen und typische Einsparungen

| Energieeinsparende Maßnahme                                                                                          | Typischer Einsparbereich |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Energieeffiziente Motoren                                                                                            | 2 – 6 %                  |
| Korrekte Bemessung                                                                                                   | 10 - 30 %                |
| Drehzahlregelbare Antriebe (Frequenzumrichter)                                                                       | bis zu 50 %              |
| Hocheffizienzgetriebe/Untersetzen                                                                                    | 1 – 14 %                 |
| Optimierung auf Systemebene: Rohrleitungssysteme, Regelkonzept, Pumpen/Armatur-Abstimmung, bedarfsgerechte Fahrweise | bis zu 60 %              |

## **A.5 Druckluftsysteme <Compressed air systems> (CAS)**

### **A.5.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Druckluft**

#### **A.5.1.1 Anwendungsbereich von Druckluft und einsatzbestimmende Eigenschaften**

Druckluft hat als Arbeitsmedium und Energieträger hauptsächlich für solche technischen Prozesse, bei denen eine mechanische Arbeit zu verrichten ist, eine lange Tradition. Die heutigen technischen Anwendungen, bei denen Druckluft verwendet wird, sind sehr vielfältig. Der Anteil der Druckluftherzeugung am gesamten Elektroenergieverbrauch liegt in vielen Industriebranchen im Bereich von 5 - 25 % des jeweiligen betrieblichen Gesamtstromverbrauchs. Der Energieverbrauch einer Druckluftanlage ist über die Laufzeit deutlicher höher als die Investitionskosten, weswegen der Energieverbrauch im Fokus sein sollte.

Häufige industrielle Anwendungen sind beispielsweise:

1. als direkt wirkendes Arbeitsmedium:

- Blasprozesse (Freistrah) Reinigen, Sortieren,
- Materialförderung,
- Formen (Kunststoff, Glas),
- Rühren (insbesondere bei Hochtemperaturprozessen wie Stahl- und Glasschmelzen),
- Sperrluft,
- Steuerluft,
- in Verbindung mit der chemischen Reaktionsfähigkeit des Luftsauerstoffs (z. B. Belebung einer Abwasserbehandlung),
- in Verbindung mit den Eigenschaften: Kühlung (seltener auch Erwärmung), Isolation (Luftpolster),
- Dämpfung (Fahrzeugreifen),

2. als indirekt wirkendes Energiemedium:

- Antrieb von Druckluftwerkzeugen,
- Antrieb von Antriebselementen (z. B. Zylinder).

Sofern der Hauptzweck der Druckluft allein in der Verrichtung mechanischer Arbeit besteht, ist zu beachten, dass der Prozess der Druckluftherzeugung und -verteilung physikalisch bedingt mit hohen Exergieverlusten verbunden ist. Dadurch steht nur ein Bruchteil der mechanischen Antriebsenergie für die Druckluftherzeugung auch als mechanische Energie am Endverbraucher der Druckluft zur Verfügung, in der Praxis meist etwa 10 - 30 %, in ungünstigen Fällen auch weniger. Die Umwandlungsverluste nehmen mit zunehmendem Systemdruck zu. Die Antriebsenergie zur Druckluftherzeugung wird während des Verdichtungsprozesses zu einem großen Teil in thermische Energie (Wärme) umgewandelt.

Es ist Stand der Technik, durch geeignete Systemgestaltungen die Einsatzbereiche der Druckluft auf die vorteilhaften Anwendungsbereiche zu konzentrieren, unnötige Verluste zu vermeiden und die insbesondere bei der Druckluftherzeugung anfallende thermische Energie bestmöglich zu nutzen.

Vorteilhafte Anwendungsbereiche von druckluftbasierten Lösungen sind vor allem dann gegeben, wenn eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften eine Rolle spielen:

- ▶ Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen möglich,
- ▶ Leistungsloses Halten möglich,
- ▶ Robustheit, Einfachheit, Überlastfähigkeit,
- ▶ Hohe Leistungsdichte/hohe Arbeitsgeschwindigkeit,
- ▶ Speicherbarkeit.

Wegen dieser besonderen Eigenschaften und dem Umstand, dass das Medium Luft praktisch überall verfügbar ist, werden viele Druckluftanwendungen auch langfristig zum Stand der Technik gehören.

Die wichtigsten Alternativen zum Einsatz von Druckluft sind, je nach Einzelfall:

- ▶ Elektrische Antriebe und elektronische Steuerungen,
- ▶ Hydraulische Antriebe,
- ▶ mechanische Werkzeuge und Antriebe (über Getriebe, Transmissionen, etc.),
- ▶ Einsatz anderer technischer Gase (auf Grund fast immer höherer Kosten nur bei speziellen Anwendungen in Verbindung mit chemischen oder physikalischen Eigenschaften relevant) bzw. flüssiger Arbeitsmedien.

#### **A.5.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Druckluft im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes**

##### **A.5.1.2.1 Bagatellschwellenprüfung**

1. Ist der geplante Endenergieaufwand für die Druckluftherzeugung  $< 10.000 \text{ kWh/a}$  = Ende der Prüfung (Bagatellschwelle)

Wenn  $E_{\text{Antrieb, Druckluft}} > 10.000 \text{ kWh/a}$ : Weiter mit Kapitel A.5.1.2.2.

oder

2. Ist die geplante Nennleistung (bezogen auf Endenergieeinsatz, also Elektroenergie oder Kraftstoff):  $< 10 \text{ kW}$  = Ende der Prüfung (Bagatellschwelle)

Wenn  $P_{\text{Antrieb, Druckluft}} > 10 \text{ kW}$ : Weiter mit Kapitel A.5.1.2.2.

Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

##### **A.5.1.2.2 Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes im Antragsverfahren**

Welche Druckluftverbraucher sind im Antragsgegenstand enthalten?

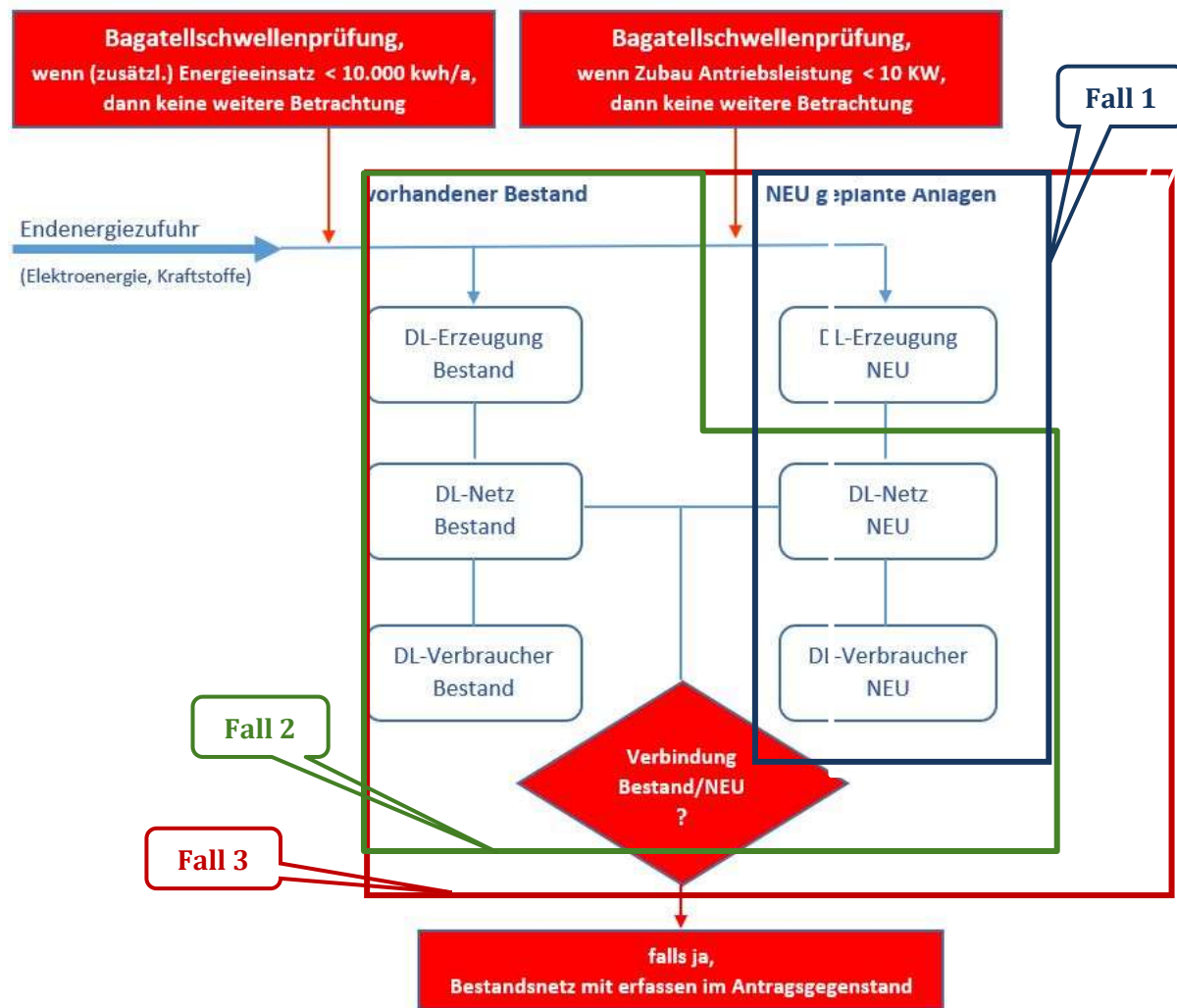
Welche Drucklufterzeuger sind im Antragsgegenstand enthalten?

Sind Bestandsanlagen zur Druckluftherzeugung vorhanden?

Sollen mit neuen Druckluftherzeugungsanlagen Verbraucher im Bestand versorgt werden?

Anhand des Prinzipschemas gemäß Abbildung A.5-1 (Bestandteil des Formularsatzes?) soll der Prüfgegenstand im Antragsverfahren gekennzeichnet werden.

Abbildung A.5-1: Schema zur Systemabgrenzung des Prüfgegenstandes Druckluft im Antragsverfahren



Quelle: eigene Abbildung, GICON, 2018

Fall 1: Es ist ausschließlich ein neu zu errichtendes Druckluftsystem zu betrachten.

Fall 2: Es werden ausschließlich Änderungen im Bestand von Druckluftverbrauchern sowie ggf. neue Druckluftverbraucher geplant, die an ein Bestandsystem zur Erzeugung und Verteilung von Druckluft angeschlossen werden.

Fall 3: Es werden neue Druckluftherzeugungs- und Verteilanlagen errichtet, welche aber auch mit Bestandsanlagen verbunden werden.

Für die Fälle 2 und 3 ist oberhalb der Bagatellschwelle eine Bestandsanalyse durchzuführen und die Umsetzbarkeit von Optimierungspotenzialen zu prüfen. Die Methodik der Bestandsanalyse soll sich an DIN EN ISO 11011 bzw. dem VDMA Einheitsblatt 4370 orientieren.

#### A.5.1.2.3 Systembetrachtung

In Anlehnung an die Internationale Norm DIN EN ISO 11011 sollen Druckluftsysteme stets als Zusammenwirken von drei funktionalen Teilsysteme betrachtet werden:

1. Erzeugung: unmittelbare Herstellung von Druckluft mittels geeigneter Maschinen, die den Druck von Gasen unter Einsatz eines Endenergieträgers (meist Elektroenergie, in Einzelfällen auch Erdgas oder Kraftstoffe) auf ein prozesstechnisch erforderliches Niveau ändern; eingeschlossen sind hierbei auch Aggregate zur Einstellung der erforderlichen Reinheitsklassen nach ISO 8573-1

2. Übertragung, die den Transport von Druckluft vom Ort der Erzeugung zum Ort des Verbrauchs umfasst;
3. Bedarf, der die Gesamtheit aller Druckluftverbraucher, einschließlich produktiver Endanwendungen und verschiedener Arten von Druckluftverlust umfasst.

Methodisch ist es sinnvoll, die Systembetrachtung ausgehend vom Bedarf/der Verbraucherebene (also von 3. zu 1.) vorzunehmen und die Anforderungen an die Übertragungs- und Erzeugungssysteme sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht daraus abzuleiten.

#### **A.5.2 Angaben zum Druckluftsystem im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung Bagatellschwellen)**

##### **A.5.2.1 Betrachtung der Druckluftverbraucher**

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen verfügt der Vorhabensträger in der Regel noch nicht über Detaildaten zu Medienverbräuchen einzelner Geräte und Anlagen.

In der Regel werden von Vorhabensträgern Detailplanungen und Bestellvorgänge, in deren Rahmen solche Daten von Lieferanten verbindlich abgefragt werden, erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sind diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabensträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar.

Die Auflistung aller wesentlichen Druckluftverbraucher sollte insbesondere folgende Angaben enthalten:

- ▶ Bezeichnung des Verbrauchers (Zusammenfassung gleichartiger Verbraucher  
Verbrauchergruppen ist ggf. zweckmäßig, z. B. Hand-Nietgeräte),
- ▶ Qualitätsanforderungen des jeweiligen Verbrauchers an die Reinheit: Partikel, Wasser, Öl,
- ▶ Druckniveau,
- ▶ Quantitativer Bedarf in der Anwendungsebene in  $\text{m}^3/\text{min}$  bzw.  $\text{l}/\text{min}$  (maximal/durchschnittlich bzw. Einsatzhäufigkeit), angegeben als Normalvolumenstrom, bezogen auf Umgebungsbedingungen am Ort des Lufteintritts vor dem Ansaugfilter,
- ▶ geprüfte und verworfene Alternativen, sofern relevant.

Eine beispielhafte Tabellenstruktur für eine solche Verbraucherliste ist in Kapitel A.5.3 enthalten. Tabelle A.5-1 stellt Beispiele von Alternativen zu druckluftversorgten Maschinen dar, die Anwendbarkeit ist allerdings mit Blick auf die tatsächliche technologische Funktionserfüllung einzelfallabhängig zu bewerten.

Tabelle A.5-1: Beispiele für mögliche Alternativlösungen

| <b>Funktion</b>                  | <b>Einsatzbereich</b>                                          | <b>Alternative</b>                             |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Kraftübertragung                 | Antriebsmotoren (Bohr-, Schraubenmaschinen, Metallbearbeitung) | Elektrische Antriebe, hydraulische Antriebe    |
| Transport                        | Materialförderung                                              | elektrische/hydraulische Antriebe              |
| Abtransport von Verunreinigungen | Ausblasinstrumente                                             | Ventilatoren, Bürsten, Spülung mit Flüssigkeit |
| Kühlung                          | Trocken laufende Fertigungsmaschinen                           | Ventilatoren, flüssige Kühlmittel              |

| Funktion              | Einsatzbereich              | Alternative           |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Prüfung und Kontrolle | Sensorik                    | Elektronische Systeme |
| Steuerung             | Steuerinstrumente (Ventile) | Elektronische Systeme |

Quelle: (44)

Aus der Verbraucherliste ist die Anforderung an das Gesamtsystem abzuleiten:

- ▶ Maximaler Druckluftbedarf ((Normal-)Volumenstrom in  $\text{m}^3/\text{min}$ ); unter Berücksichtigung von Zuschlägen für Leckagen, Alterung von Werkzeugen, Reserve für Produktionserweiterungen,
- ▶ Benötigtes Druckniveau des Netzes, ggf. Prüfung der Zweckmäßigkeit mehrerer Druckstufen, insbesondere wenn der Verbrauchsanteil der Verbraucher mit hohen Druckniveau gering ist,
- ▶ Je niedriger das Druckniveau der Druckluft ist, umso kostengünstiger ist die Erzeugung. Im technisch häufigsten Anwendungsbereich von 5 - 10 bar Systemdruck bedeutet die Reduzierung des Druckniveaus um 1 bar bei gleichem Ansaugvolumenstrom eine Minderung des Energieeinsatzes am Kompressor von 6 - 8 %. Es ist jedoch erforderlich, sicherzustellen, dass alle aktiven Verbraucher zu jeder Zeit mit ausreichend komprimierter Luft versorgt werden.
- ▶ Benötigtes Qualitätsniveau der Druckluft, ggf. Prüfung der Zweckmäßigkeit mehrerer Teilnetze mit unterschiedlicher Qualität, insbesondere wenn der Verbrauchsanteil der Verbraucher mit hohen Qualitätsanforderungen gering ist,
- ▶ Erwarteter Schwankungsbereich des Druckluftbedarfs (Teillastverhalten).

#### A.5.2.2 Betrachtung des Druckluft-Verteilsystems

Für eine energetisch optimale Auslegung des Druckluftsystems müssen auch die Übertragungsverluste betrachtet werden. Hohe Druckverluste im Leitungssystem führen zu überproportionalen Energieverlusten. Als Grundregel sollte der Druckabfall zwischen der Bereitstellung (Ausgang Kompressor) und dem Endverbraucher 1 bar nicht überschreiten.

Die Aufschlüsselung dieser Druckverluste sollte sich im Regelfall an folgenden Werten orientieren (45):

- ▶ Rohrleitungen (Haupt-, Verteil- und Anschlussleitung) < 0,1 bar,
- ▶ Aufbereitung (Kältetrockner und Filter) < 0,2 bar,
- ▶ Anschlusszubehör (Abscheider, Schlauch, Öler) < 0,5 bar,
- ▶ Schalthysterese am Kompressor: 0,2 bar (max. bis 0,5 bar).

Im Bereich der Verteilung wird auch die Druckluftspeicherung mit betrachtet. Sie weist sowohl energetische als auch systemtechnische Vorteile auf, welche im Kapitel A.5.2.3 weiterführend betrachtet werden.

Vergleichbar zur Planung der druckluftverbrauchenden Maschinen und Geräte findet auch die detaillierte Planung des Druckluftverteilnetzes meist erst nach Erhalt einer Genehmigung statt, so dass auch für diesen Systemabschnitt vorzugsweise Prüf- und Dokumentationsauflagen mit Fälligkeit zum Inbetriebnahmezeitpunkt erteilt werden sollten.

Abgesehen von räumlich kleinen und nur wenige Verbraucher versorgenden einfachen Druckluftverteilungen ist eine softwarebasierte Planung von Verteilnetzen incl. Druckverlustberechnung Stand der Technik und damit im Regelfall ohne Mehraufwand zur Inbetriebnahme einer Anlage durch den Vorhabensträger leistbar.

Die zum Inbetriebnahmezeitpunkt vom Vorhabensträger vorzuhaltende Planung/Dokumentation sollte u. a. folgende Themen umfassen (kann als Hinweis in Genehmigungsbescheid formuliert werden):



- ▶ Dimensionierung der Rohrleitungsverbindungen (Fließgeschwindigkeit im Regelfall  $< 6 \text{ m/s}$ ; gleicher und konstanter Fließdruck an allen Abnahmestellen),
- ▶ Materialauswahl (glatte, korrosions- und oxydationsfeste Rohre), wenn möglich spaltfreie, wartungsfreie Rohrverbindungen,
- ▶ Minimierung zusätzlicher Druckverluste durch Minimierung der Transportlängen und von Krümmungen, Einbauten etc..

Zusätzlich sollten – sofern für den Einzelfall relevant - folgende Prinzipien beachtet werden:

- ▶ Dichte Absperrbarkeit nicht benötigter Netzabschnitte, z. B. bei Maschinenstillstand, möglichst nah am Drucklufterzeuger bzw. -speicher,
- ▶ Ausbauoptionen auf Verbraucherseite: ausreichende Querschnitte der Hauptleitungen,
- ▶ Druckstufen: ggf. bei einzelnen Verbrauchern mit hohem Druckniveau Druckerhöhung vorsehen, nicht umgekehrt für viele Verbraucher vom hohen Druck auf niedrigen Druck reduzieren,
- ▶ Druckluftqualitäten: ggf. bei einzelnen Verbrauchern mit hohem Qualitätsbedarf dezentrale Aufbereitung vorsehen, nicht umgekehrt für alle Verbraucher die höchste und ggf. nicht erforderliche Qualität bereitstellen,
- ▶ Druckluftspeicher: Dimensionierung/Positionierung in Abhängigkeit von Druckluft-erzeugungskonfiguration und Lastverhalten der Verbraucher (vgl. Kapitel A.5.2.3.).

#### **A.5.2.3 Druckluftspeicher**

Da praktisch fast jedes Druckluftsystem schwankende Lasten aufweist, gehören Druckluftspeicher zu den Standard-Komponenten eines Druckluftsystems. Das kann benötigte Spitzenleistung des Kompressors herabsenken und damit die Größe und die Kosten für einen Kompressor verringern. Zweiter Effekt eines Speichers ist die zusätzliche Netzstabilität. Druckluftspeicher können sowohl zentral als auch dezentral eingesetzt werden. Dezentrale Speicher sind besonders bei großen Lasten von einem einzelnen Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen vorteilhaft, da diese einen ungewollten Druckabfall im Gesamtsystem auffangen können.

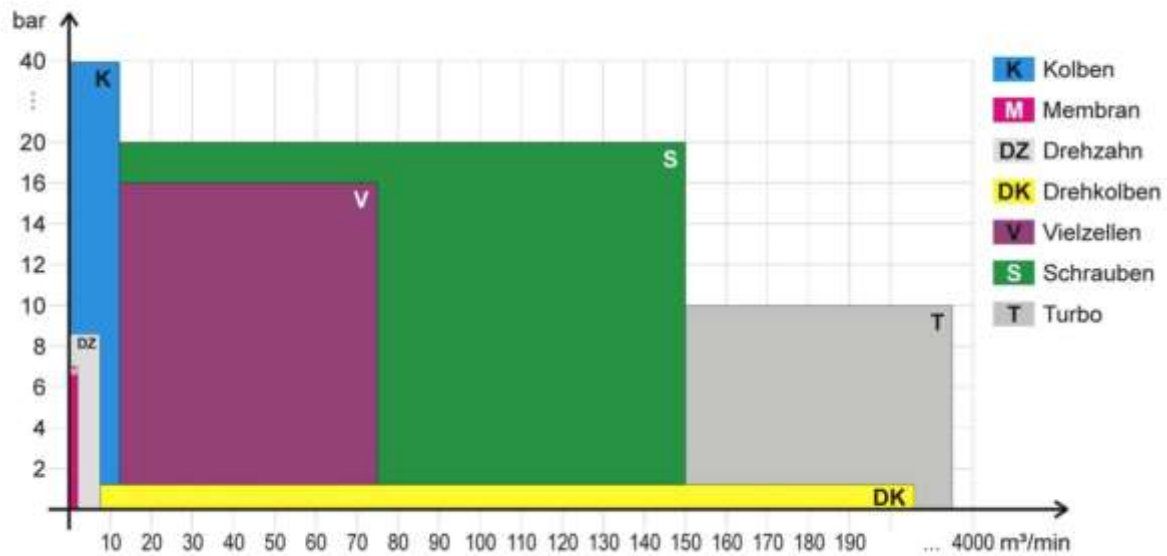
In Druckluftsystemen ohne drehzahlgeregelte Kompressoren dienen Speicher außerdem zur Reduktion der Kompressorschaltzyklen.

#### **A.5.2.4 Drucklufterzeugung**

##### **A.5.2.4.1 Auswahl Kompressortyp**

Für eine physikalisch sinnvolle Auswahl der Kompressoren sind besonders die Parameter Volumenstrom und Druckniveau relevant. Nachfolgende Abbildung stellt unterschiedliche Verdichterbauarten gegenüber und ordnet sie entsprechend ihres primären Arbeitsbereiches zu. Entsprechend dieser Darstellung sollten Kolbenkompressoren vorrangig bei hohen Druckunterschieden und kleinen Volumenströmen und Turbokompressoren bei kleinen Druckunterschieden und großen Volumenströmen eingesetzt werden.

Abbildung A.5-2: Typische Einsatzbereiche von Kompressorenbauarten



Quelle: (46)

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Kompressoren zu ermöglichen, werden Kennzahlen gebildet. Im Bereich der Kompressoren ist die Verwendung der folgenden Kennzahl Stand der Technik:

$$1. \quad P_{\text{spezif}}(p_{\text{Netz}}) [\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})] = P_{\text{zu, gesamt}} [\text{kW}] / \dot{V} [\text{m}^3/\text{min}]$$

Ein Kennzahlenvergleich ist immer nur für den gleichen Systemdruck  $p_{\text{Netz}}$  möglich. Die Formelzeichen bedeuten:

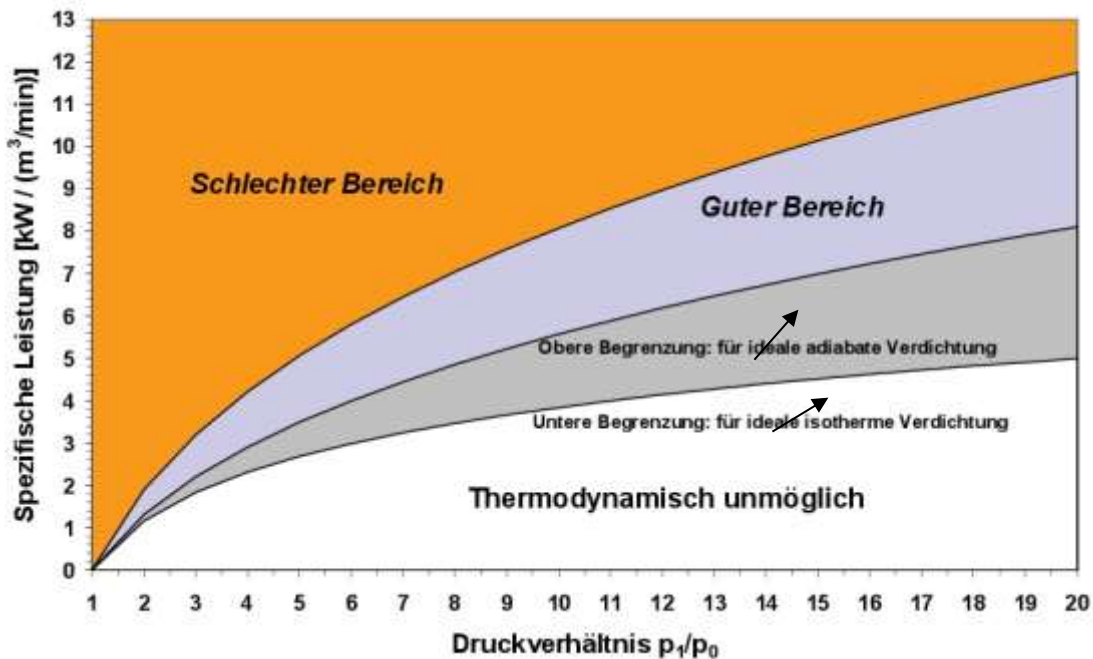
- $P_{\text{spezif}}(p_{\text{Netz}}) [\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})]$ : spezifische Leistungsaufnahme der gesamten Drucklufterzeugung bezogen auf den Druck im Verteilnetz ( $p_{\text{Netz}}=p_1$ ), der Druck wird als Überdruck = Differenz zum Umgebungsdruck angegeben
- $P_{\text{zu, gesamt}} [\text{kW}]$ : Leistungsaufnahme aller Teilsysteme der Drucklufterzeugung von der Ansaugung der Umgebungsluft bis zur Einspeisung in das Verteilsystem, also insbesondere Leistungsaufnahme des Motors, des Trockners sowie ggf. von Lüftern;
- $\dot{V} [\text{m}^3/\text{min}]$ : Volumenstrom im Umgebungszustand (Umgebungsdruck  $p_0$ , Umgebungstemperatur) an der Ansaugstelle

Die Kennwertbildung erfordert eine klare Definition des Bilanzraumes, deshalb ist zwingend eine Normengrundlage zu verwenden und anzugeben wie z. B. ISO 1217, Anhang C.

Innerhalb einer Bauarten- und Leistungsklasse können bei Aggregaten verschiedener Hersteller z. T. erhebliche Unterschiede bei dieser die Effizienz beeinflussenden Kennzahl bestehen. Abbildung A.5-3 verdeutlicht die Bandbreite der Kennzahl im praktisch am häufigsten relevanten Bereich.

Vorhabensträger sollten sich bei der Auswahl der Drucklufterzeugungsanlagen auf den guten Kennzahlbereich orientieren. Da in den meisten Anwendungsfällen, vor allem bei hohen Benutzungsstundenzahlen, die Energiekosten mehr als 75 % der Lebenszykluskosten betragen, ist eine hohe Priorität dieses Auswahlkriteriums ökologisch wie ökonomisch sinnvoll.

Abbildung A.5-3: Spezifischer Leistungsbedarf für die Druckluftherzeugung



Quelle: (46)

#### A.5.2.4.2 Konfiguration der Druckluftherzeugung und Regelung

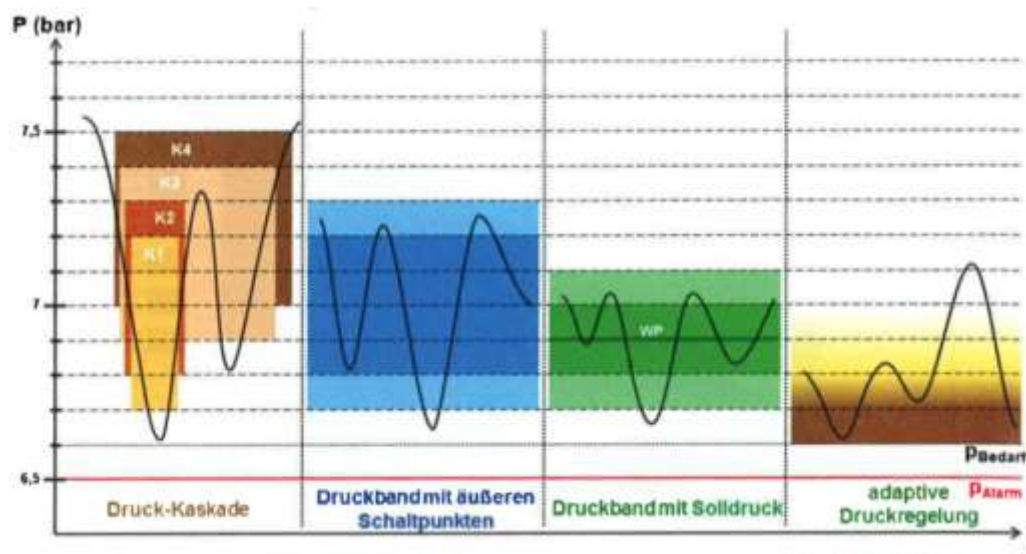
Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit mit Druckluft und zur quantitativen Anpassung der Druckluftherzeugung an den jeweiligen Bedarf kommen in Abhängigkeit von der Benutzungsstundenzahl und der Schwankungsbreite des benötigten Volumenstromes verschiedene Strategien zur Systemoptimierung in Betracht.

Das Ziel in Bezug auf eine hohe Energieeffizienz sollte darin bestehen, die Anzahl von Schaltvorgängen und damit Leerlaufzeiten von Kompressoren zu minimieren und den Netzdruck stabil in möglichst geringem Abstand zum Bedarfsdruck zu halten.

Es ist Stand der Technik, komplexe Druckluftversorgungssysteme mit einer Kombination aus unregulierten Kompressoren mit konstanter Druckluftproduktion und drehzahlregulierten Kompressoren sowie Druckluftspeichern und einer übergeordneten Regelung über alle Erzeuger auszustatten. Damit soll die Einhaltung niedrigen, am Bedarfsdruck orientierten Systemdrucks bei gleichzeitiger Minimierung der Schaltzyklen erreicht werden. In Abbildung A.5-4 ist dies insbesondere durch die beiden im rechten Bildteil veranschaulichten Regelstrategien dargestellt.

Die Systemkonfiguration sollte in einer entsprechenden Planungsdokumentation durch qualifizierte Fachleute hergeleitet und dokumentiert sein.

Abbildung A.5-4: Minimierung der Systemdruckschwankungen nahe am Solldruck durch übergeordnete Regelstrategien: Je schmaler das Druckband und je näher dieses am Solldruck  $p_{\text{Bedarf}}$  geführt wird, desto energieeffizienter ist die Regelstrategie.



Quelle: (47)

#### A.5.2.4.3 Druckluftaufbereitung

Die Qualität/Reinheit der Druckluft ohne Aufbereitung ist für die meisten Anwendungen nicht ausreichend und würde zu Schäden im Verteilsystem, im versorgten technischen System und/oder zu einer kritischen Minderung der Produktqualität führen (46).

An die Druckluft sind je nach Anwendungsbereich unterschiedliche Anforderungen an die Qualität gestellt. Die Qualität umfasst feste Partikel, Feuchtigkeit, flüssiges Wasser und den Ölgehalt. ISO 8573-1:2010 definiert die Qualität der Druckluft für drei Arten von Schadstoffen für unterschiedliche Anwendungsbereiche:

|                                     |    |         |
|-------------------------------------|----|---------|
| ► Feste Partikel                    | 8  | Klassen |
| ► Feuchtigkeit und flüssiges Wasser | 10 | Klassen |
| ► gesamter Ölgehalt                 | 5  | Klassen |

Die Aufbereitung der Druckluft ist auf der einen Seite notwendig, um eine hohe Produktqualität zu gewährleisten, Umweltverschmutzung zu minimieren und Korrosion vorzubeugen. Auf der anderen Seite bedarf sie Zusatzenergie und verursacht Druckverluste, welche sich wiederum durch einen höheren Ausgangsdruck widerspiegeln. Daher sollte bei der Aufbereitung der Druckluft die Regel, „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“ beachtet werden.

Die Druckluft wird meist zentral nach der Erzeugung aufbereitet. Es kann jedoch auch von Vorteil sein, eine dezentrale Variante zu installieren, wenn einzelne wenige Verbraucher besondere Ansprüche an die Qualität haben.

Die Auslegung der Druckluftaufbereitung sollte in einer entsprechenden Planungsdokumentation durch qualifizierte Fachleute hergeleitet und bis zum Zeitpunkt des Baubeginns dokumentiert sein.

#### A.5.2.4.4 Abwärmenutzung

Aus dem Verdichtungsprozess eines industriellen Druckluftkompressors muss eine Energiemenge, welche fast 100 % der Antriebsenergiemenge entspricht, in Form von Wärme abgeführt werden. Ein großer Teil (bis zu 95 %) dieser thermischen Energie kann auf einem Temperaturniveau bis zu 80 °C als Nutzwärme verwendet werden. Die Wärmeenergie, die bei der Erzeugung der Druckluft entsteht, sollte daher bei der Neuplanung einer Anlage berücksichtigt werden.

Es ist Stand der Technik, einen großen Teil dieser thermischen Energie auf einem Temperaturniveau von 50 °C - 75 °C für Heizzwecke zu verwenden.

#### Exkurs: Exergetische Bilanzierung von Druckluftherzeugungssystemen

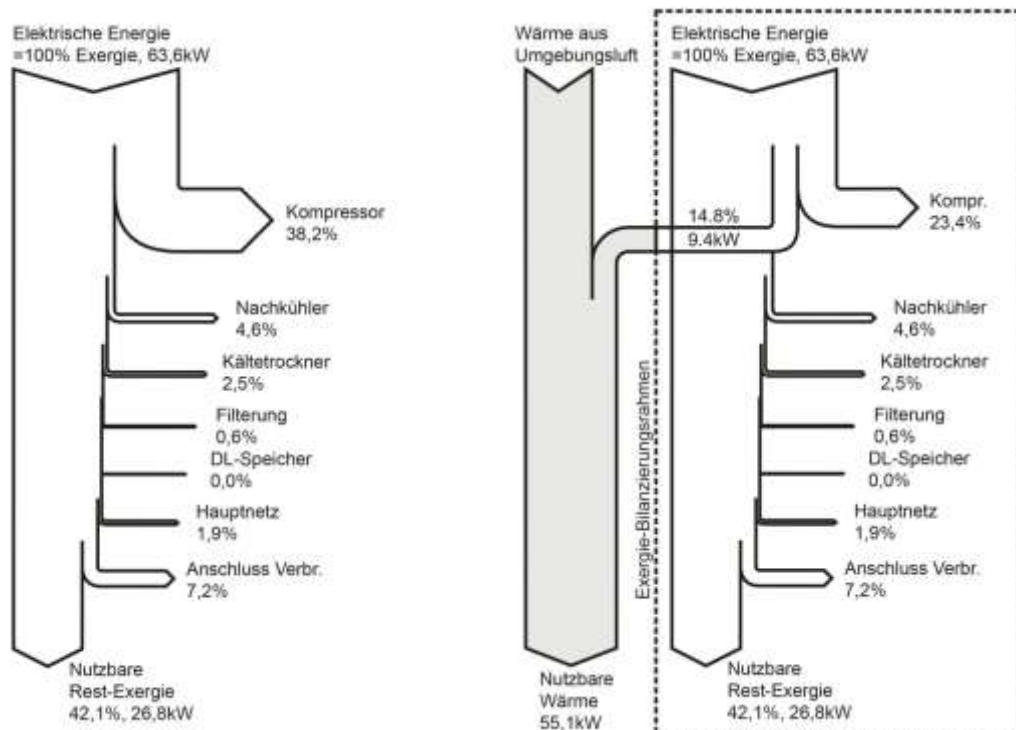
Die Exergie, also das theoretische Energiepotenzial der Druckluft zur Umwandlung in mechanische Arbeit, liegt je nach Systemdruck und Randbedingungen bei den meisten industriellen Anwendungen bei ca. 25 % - 45 % der ursprünglich aufgewendeten Elektroenergie für die Anlagen zur Druckluftherzeugung und -Aufbereitung. Bei herkömmlichen pneumatischen Anwendungen wie z. B. Druckluftschraubern wird wiederum nur ein Teil dieses Energiepotenzials tatsächlich als mechanische Antriebsleistung wirksam.

Abbildung A.5-5 zeigt typische Exergiebilanzen einer Druckluftanlage, berechnet aus einem konkreten Anwendungsbeispiel. Qualitativ sind alle technischen Anwendungen mit dieser Darstellung vergleichbar, es können sich allerdings erheblich andere quantitative Verhältnisse ergeben.

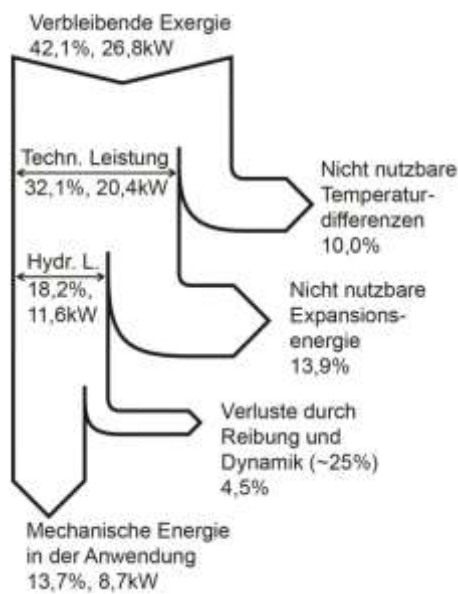
Das rechte Diagramm verdeutlicht außerdem das Potenzial der Wärmenutzung unter Beachtung des Wärmeenergieinhaltes der angesaugten Umgebungsluft. Die nutzbare Rest-Exergie der komprimierten Druckluft könnte theoretisch wieder in mechanische Energie umgewandelt werden. Die tatsächliche Ausnutzung des Exergiepotenziales ist sehr stark von den Randbedingungen der Anwendung abhängig, wie beispielhaft in Abbildung A.5-6 veranschaulicht wird.

Abbildung A.5-5: Exergieflussdiagramme (Links ohne und rechts mit Wärmerückgewinnung) für ein Anwendungsbeispiel einer industriellen Druckluftanlage (nach (48))

Abbildung



A.5-6: Exergieverluste in einer beispielhaften herkömmlichen pneumatischen Anwendung, Fortführung aus Abbildung A.5-5



Systeme für die Abwärmenutzung sind für die meisten Kompressoren am Markt als Sonderzubehör verfügbar, entweder integriert in die Kompressoreinheit oder als eine externe Lösung. Auch ein bestehendes Druckluftsystem kann oft zu wirtschaftlich interessanten Konditionen nachgerüstet werden.

Voraussetzung für die Installation einer Abwärmenutzung ist jedoch, dass für die erfasste Wärme auch Wärmeabnehmer bzw. Wärmesenken zur Verfügung stehen, bei denen durch die Einbindung der Abwärme aus der Druckluftherzeugung andere Endenergiemengen substituiert werden.

Daher ist eine rechtzeitige Prüfung und planerische Berücksichtigung der Abwärmenutzung im Rahmen der Vorhabensentwicklung erforderlich. Qualitativ sollte dies bereits zum Zeitpunkt der Vorplanung erfolgen und als Information den Genehmigungsantragsunterlagen beigelegt werden.

Die konkrete planerische Ausführung durch qualifizierte Fachleute ist meist erst im Rahmen der Detailplanung nach dem Zeitpunkt der Vorhabensgenehmigung möglich und sollte dementsprechend als Dokumentation zum Zeitpunkt des Baubeginns vorliegen.

#### **A.5.2.5 Betrieb von Druckluftanlagen**

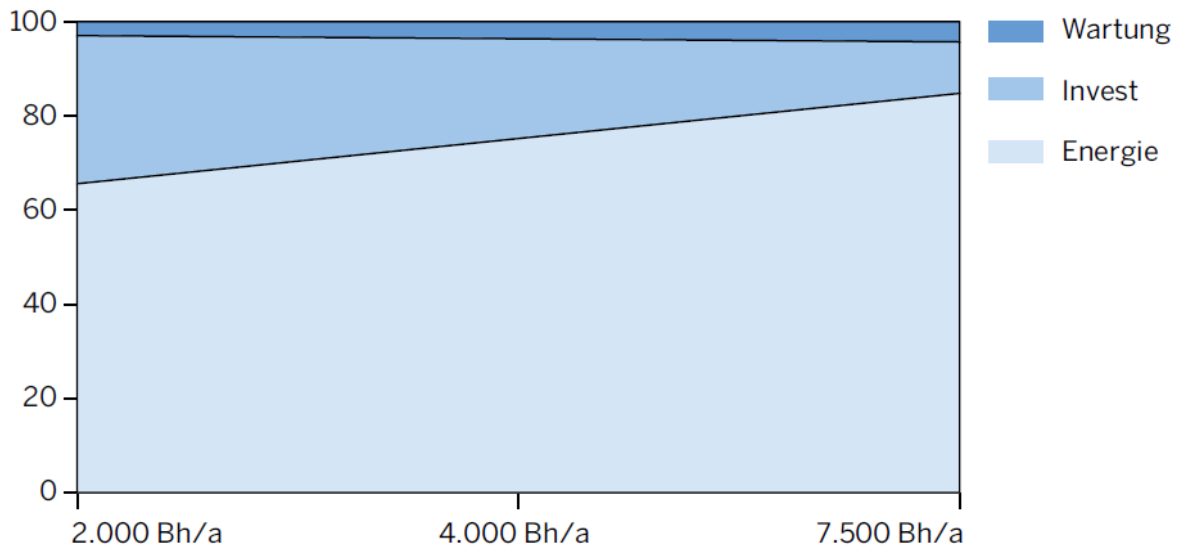
Über die Lebensdauer einer Druckluftanlage entfallen je nach jährlichen Betriebsstunden 70 - 90 % der Kosten auf die für den Antrieb der Kompressoren und den Betrieb der Aufbereitungssysteme benötigte Energie, meist Elektroenergie. Die Investitionskosten und die Instandhaltungskosten haben nur einen Anteil von bis zu 20 % bzw. bis zu 15 % (49). Typische Kostenrelationen zeigt die Abbildung A.5-7.



Abbildung A.5-7: Aufteilung der Druckluftkosten in Abhängigkeit von Betriebsstunden

### Aufteilung der Druckluftkosten nach Betriebsstunden in %

Basis: 5 Cent/kWh; Abschreibung 5 Jahre; Zinsen 5 %



Quelle: VDMA

Quelle: (50)

Deshalb ist sowohl aus ökonomischen Gründen als auch im Sinne des Energieeffizienzgebotes eine optimale Betriebsführung von Druckluftanlagen sicherzustellen, hierzu gehören

- ▶ Schulung der für das Druckluftsystem zuständigen Mitarbeiter,
- ▶ Sicherstellung der erforderlichen Wartungs-, Inspektions- und Instandhaltungsmaßnahmen incl. einer regelmäßigen Leckageprüfung,
- ▶ Monitoring der betriebs- und energieverbrauchsrelevanten Parameter.

In einem ungewarteten bzw. nicht ausreichend gewarteten Druckluftsystem können sich im Laufe der Zeit erhebliche energetische Verluste entwickeln. Regelmäßig zu wartende Komponenten sind:

- ▶ Kompressor,
- ▶ Trockner,
- ▶ Filter,
- ▶ Kühltssystem,
- ▶ Öl-Abscheidepatrone,
- ▶ Kondensatableiter,
- ▶ Öl-Wassertrenner,
- ▶ Verteilsystem,
- ▶ Druckluft-Werkzeuge/Endverbraucher.

Stand der Technik zumindest bei größeren Druckluftsystemen mit hohen Benutzungszahlen ist eine kontinuierliche Daten- und Zustandserfassung der wesentlichen Systemkomponenten, einschließlich Energieverbrauchsdaten und Druckluftmengenmessung zumindest der Drucklufterzeugung. Somit können Fehler und Abweichungen von Betriebsparametern schneller und besser identifiziert werden. Langfristig ist mit diesem Daten- und Informationsaustausch eine bedarfsabhängige Wartung möglich.





## A.6 Pumpensysteme

### A.6.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Pumpensysteme

#### A.6.1.1 Anwendungsbereich von Pumpensystemen und einsatzbestimmende Eigenschaften

Pumpensysteme dienen der Förderung von flüssigen (fließfähigen) Medien und sind in Industrie und Gewerbe weit verbreitet. Es existieren sehr unterschiedliche Ausführungsformen und Größenordnungen in fast allen Branchen. Zu häufigen Anwendungsaufgaben für Pumpen zählen z. B.

- ▶ Förderung flüssiger Rohstoffe und Produkte,
- ▶ Umwälzung von flüssigen Wärmeträgern,
- ▶ Druckauflastung in hydraulischen Systemen,
- ▶ Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser,
- ▶ Förderung von Abwasser und Gemischen aus Flüssigkeiten und Feststoffen.

Pumpensysteme beanspruchen über 10 % (51) des weltweiten Strombedarfs. In bestimmten Industriezweigen erreicht der Anteil des Verbrauchs der Pumpen am Gesamtenergieverbrauch sogar über 30 % (51).

#### A.6.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz des Einsatzes von Pumpensystemen im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes

##### A.6.1.2.1 Abgrenzung zu anderen Prüfaufgaben

Pumpensysteme lassen sich in allen industriellen Anwendungen finden. Bei einer Bagatellschwellenprüfung ist zu berücksichtigen, dass Pumpen u.a. im Bereich der Querschnittstechnologien Heizung und Kühlung eingesetzt werden und für diesen Bereich analog einer Bagatellschwellenprüfung unterzogen werden. Die Relevanz des Einsatzes von Pumpensystemen sollte also auf den Bereich von Pumpensystemen beschränkt werden, die nicht dem Bereich Heizung und Kühlung zuzuordnen sind. Im weiter gefassten Sinne sind dies Pumpen, die für verfahrenstechnische Aufgaben notwendig sind oder der Ver- oder Entsorgung von Medien dienen (z. B. Wasser- oder Abwasserpumpen). Nachfolgend werden diese als „Prozesspumpen“ bezeichnet.

##### A.6.1.2.2 Bagatellschwellenprüfung

- ▶ Ist der geplante Endenergieaufwand für den Betrieb **von Prozesspumpen**  $< 10.000 \text{ kWh/a}$  = Ende der Prüfung (Bagatellschwelle)

Wenn  $E_{\text{Antrieb, Prozesspumpen}} > 10.000 \text{ kWh/a}$ : Weiter mit Kapitel A.6.1.2.3.

oder

- ▶ Ist die geplante Nennleistung **von Prozesspumpen** (bezogen auf Endenergieeinsatz, also Elektroenergie oder Kraftstoff):  $< 10 \text{ kW}$  = Ende der Prüfung (Bagatellschwelle)

Wenn  $P_{\text{Antrieb, Prozesspumpen}} > 10 \text{ kW}$ : Weiter mit Kapitel A.6.1.2.3.

Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

##### A.6.1.2.3 Systembetrachtung

Ein Pumpensystem besteht im engeren Sinne aus drei folgenden Komponenten:

- ▶ Antrieb (i. d. R ein Elektromotor),

- ▶ Kraftübertragungseinheit (Getriebe, Welle),
- ▶ Pumpe.

Die Leistungsanforderungen dieses Systemes (Fördermenge und Förderhöhe im zeitlichen Verlauf) werden sehr wesentlich von der Gestaltung des Rohrnetzes und dem Bedarfsprofil der versorgten Verbraucher bestimmt. Eine weiter gefasste Begriffsdefinition eines Pumpensystems berücksichtigt folglich auch die Einflüsse des Rohrnetzes und der Verbraucher.

Definitionen und Begrifflichkeiten von Pumpensystemen sind u. a. in den Normen DIN EN ISO 17769:2012-11 – Teil 1 „Flüssigkeitspumpen“ (52) und Teil 2 „Pumpensysteme“ (53) beschrieben.

**Die höchste Energieeffizienz kann nur dann erreicht werden, wenn das Pumpensystem inkl. der Rohrleitungen als Gesamtheit betrachtet und optimiert wird. Eine isolierte Betrachtung einzelner Systemkomponenten ist möglich, aber weniger zielführend.**

Um eine dauerhaft energieeffiziente Betriebsweise von Pumpensystemen sicherzustellen, sind folgende „Bausteine“ notwendig (Nennung in zeitlicher Abfolge):

- ▶ quantifizierte Analyse der Förderaufgabe,
- ▶ qualifizierte Planung und Auslegung/Auswahl der Einzelkomponenten,
- ▶ bedarfsgerechte Betriebsführung,
- ▶ fachgerechte Instandhaltung.

Die beiden erstgenannten Punkte erfordern besondere Fachkenntnisse, die in der Regel durch Personal des Antragstellers nicht oder nicht vollständig vorliegt. Insofern erfordert dies in der Regel die Einbeziehung qualifizierter Fachplaner.

#### **A.6.2 Angaben zu Pumpensystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens**

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen verfügt der Vorhabenträger häufig noch nicht über Detaildaten zur Auslegung und Dimensionierung von Pumpen- und Rohrleistungssystemen. In der Regel werden von den Vorhabenträgern Detailplanungen und Bestellvorgänge, in deren Rahmen solche Daten rechnerisch ermittelt oder von Lieferanten verbindlich angegeben werden, erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sollten diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabenträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar sein.

Die Dokumentation eines qualifizierten Planungsprozesses für Pumpensysteme beinhaltet insbesondere:

- ▶ Beschreibende Dokumentation (Vor- und Entwurfsplanung) mit Darstellung der Förderaufgabe und ggf. wirtschaftlicher Bewertung technischer Alternativlösungen,
- ▶ Verfahrens- bzw. Rohrleitungs- und Instrumentierungs- (R&I) Fließbilder, die den technologischen Prozess, die Medienversorgung sowie die Gestaltung der Heizungs- und Kühlsysteme abbilden,
- ▶ Rohrleitungsisometrien,
- ▶ Ergebnisse softwarebasierter Auslegungs- (z. B. Heiz- und Kühllastberechnungen, Pumpenauswahl) und Druckverlustberechnungen,
- ▶ Ergebnisse durchgeführter Lebenszykluskostenanalysen (LCC-Analysen),
- ▶ Elektroenergieverbraucherlisten,
- ▶ Datenblätter/Kennliniendarstellungen eingesetzter Pumpen,
- ▶ Messstellenliste.

In nachfolgenden Kapiteln werden das methodische Herangehen bei der Auslegung und Dimensionierung sowie wesentliche Merkmale energieeffizienter Pumpensysteme beschrieben. Die Darstellungen beziehen sich nur auf neu zu errichtende Pumpensysteme. Das methodische Vorgehen bei der Analyse und Optimierung oder Erweiterung von Bestandsystemen ist im Abschlussbericht (54) näher erläutert.

#### **A.6.2.1 Förderaufgabe**

Eine exakte Analyse der Förderaufgabe ist die wichtigste Voraussetzung für eine an die Anwendung angepasste und energieeffiziente Pumpentechnik. Wesentliche Kriterien zur Beschreibung der Förderaufgabe sind:

- ▶ zu fördernder maximaler Volumenstrom,
- ▶ zu überwindende geodätische Höhe bzw. Druckdifferenz (maximaler Systemdruck ausgangsseitig / minimaler Systemdruck eingangsseitig),
- ▶ zu überwindende Transportentfernung (Länge der Rohrleitungen),
- ▶ Eigenschaften des zu fördernden Mediums (z. B. Scherempfindlichkeit, Viskosität, Abrasivität bei Feststoffanteilen, Temperaturbereich, chemische Aggressivität, Gefahrstoffeigenschaften),
- ▶ Lastprofil (konstant/variabel), Anforderungen an die Regelbarkeit,
- ▶ Betriebsstundenzahl,
- ▶ Dichtheits- und Hygieneanforderungen,
- ▶ Verfügbarkeitsanforderungen,
- ▶ Aufstellbereich/Zugänglichkeit von Systemkomponenten für Wartung/Instandhaltung.

#### **A.6.2.2 Rohrleitungssystem**

Das Rohrleitungssystem dient in erster Linie zur Überbrückung von Distanzen zwischen den verfahrenstechnischen Systemkomponenten (z. B. Behälter, Reaktoren, Wärmeübertrager o. ä.). Anhand der identifizierten Förderaufgabe (vgl. Kapitel A.6.2.1) sind die damit verbundenen Drücke und Volumenströme als Eingangsgrößen zur Auslegung der Rohrleitungen und der Systemkomponenten (Armaturen, Filter, Regeleinrichtungen etc.) definiert.

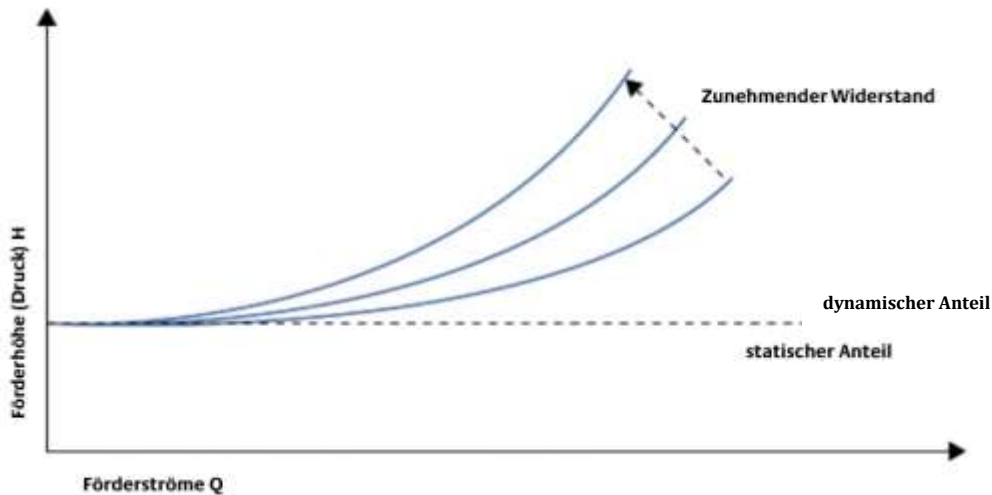
Mit einem Pumpensystem wird einer Flüssigkeit Energie zugeführt, um diese entweder auf eine bestimmte Höhe zu transportieren, deren Druck und/oder Fließgeschwindigkeit zu erhöhen. Die Druckerhöhung durch die Pumpe muss folglich bestehende Höhen- oder Druckdifferenzen (statischer Anteil) und zusätzlich strömungsbedingte Druckverluste (dynamischer Anteil) bis zum Zielpunkt der Förderung überwinden:

- ▶ Der statische Anteil ist vom Förderstrom unabhängig und beschreibt den geodätischen Höhenunterschied und/oder die Druckdifferenz zwischen Ein- und Austrittspunkt des betrachteten Systems.
- ▶ Der dynamische Anteil steigt mit wachsendem Förderstrom quadratisch an und wird durch folgende Druckverluste beeinflusst:
  - Einzeldruckverluste (Widerstand beim Durchströmen von Formstücken wie Rohrkrümmern, Abzweigungen und Einbauten wie Armaturen, Flanschen oder Ventilen),
  - streckenabhängige Druckverluste (auftretende Reibung zwischen dem strömenden Fluid und der Rohrrinnenwand).

Die Druckverluste durch Reibung sind abhängig vom Strömungsverhalten und den Eigenschaften der transportierten Flüssigkeit sowie der Oberflächenbeschaffenheit (Rauheit) der Rohrrinnenwand.

Die oben beschriebenen Zusammenhänge finden Ihre Darstellung als „Anlagenkennlinie“ in Durchfluss (Q) – Förderhöhen (Druck) (H) - Diagrammen (Beispiel in Abbildung A.6-1). Druckdifferenzen werden hierbei praxisüblich als Höhendifferenzen H ausgewiesen, die sich unter Berücksichtigung der Dichte des Fördermediums und der Erdbeschleunigung ergeben.

Abbildung A.6-1: Beispielhafte Anlagenkennlinien im Q/H-Diagramm, ergänzt



Quelle: (55)

Rohrleitungssysteme sind wie folgt grundsätzlich zu unterscheiden:

- ▶ Offene Systeme haben meist die Aufgabe der Förderung des Mediums zu einem bestimmten Zielpunkt, wie z. B. bei Wasserversorgungsanlagen, Bewässerungssystemen und industriellen Prozessanlagen. In solchen Systemen muss die Pumpe die statische Förderhöhe bewältigen und die Reibungsverluste in Rohren und Bauteilen überwinden.
- ▶ Geschlossene Systeme sind in den meisten Fällen Kreislauf- bzw. Umwälzsysteme, in denen das umlaufende Medium als Wärmeträger fungiert, wie beispielsweise in Heizsystemen oder Kühlsystemen. In diesen Fällen muss die Pumpe ausschließlich dynamische Verluste im System überwinden.

Eine Druckverlustberechnung als Bestandteil einer qualifizierten Planung ist ein Merkmal bester verfügbarer Technik.

Zur Reduzierung der zum Flüssigkeitstransport erforderlichen mechanischen Arbeit sind folgende Planungsgrundsätze zu berücksichtigen:

- ▶ Minimierung von Rohrleitungslängen,
- ▶ Beschränkung von Einbauteilen, Armaturen oder Drosseleinrichtungen auf ein notwendiges Minimum,
- ▶ Vermeidung unnötiger Querschnittsänderungen, Vereinigungen und Verzweigungen (z. B. T-Stücke) sowie überflüssigen Biegungen,
- ▶ Auswahl eines angepassten Rohrquerschnitts,
- ▶ Minimierung der Oberflächenrauheit der Rohrrinnenwand.

Eine Besonderheit bei vermaschten Rohrnetzen, wie diese z.B. im Bereich der Heizung, Klimatisierung und Kühlung Anwendung finden ist die Tatsache, dass sich eine Über- oder Unterversorgung von Verbraucher und Strangabschnitten einstellen kann, wenn sich ungeregelte Druckverhältnisse im

System einstellen. Um eine Unterversorgung von Leitungsabschnitten, die weit entfernt von der Umwälzpumpe liegen, muss bei einem hydraulisch nicht abgeglichenen System die Pumpenleistung/die Druckdifferenz erhöht werden. Dies führt zu einem erhöhten Energieverbrauch der Pumpe sowie häufig Geräuschproblemen in der Anlage. Die beschriebenen Probleme können vermieden werden, wenn bereits bei der Rohrnetzplanung/-berechnung Durchflussbegrenzer (z. B. voreinstellbare Thermostatventile, Differenzdruckregler etc.) vorgesehen und dimensioniert werden. Die Durchführung eines hydraulischen Abgleichs ist normativ geregelt. Eine umfassende Übersicht hierzu gibt das VDMA-Einheitsblatt 24199 (56). Darin wird weiterhin auf die folgenden Regelwerke verwiesen: DIN EN 14336 (57), DIN V 4701-10 (58), DIN 18380 (59). Die normgerechte Umsetzung des hydraulischen Abgleichs in entsprechenden Rohrleitungssystemen lässt sich durch Vorlage entsprechender Auslegungsberechnungen und Inbetriebnahme-/Abnahmeprotokolle dokumentieren.

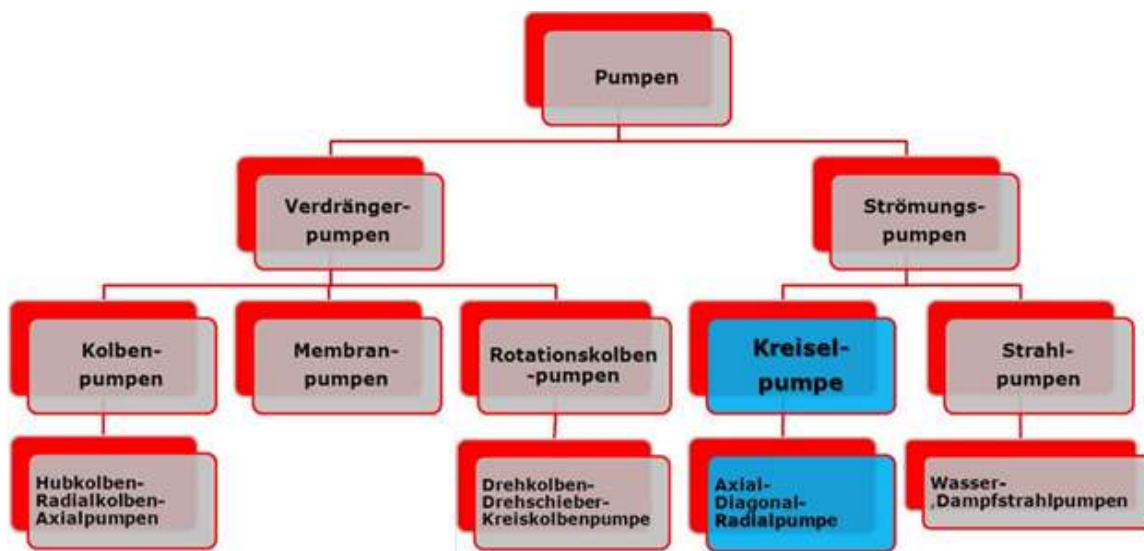
### A.6.2.3 Pumpe

Pumpen werden entsprechend ihres Funktionsprinzips, die Antriebsenergie an die Flüssigkeit zu übertragen und diese in eine gerichtete Bewegung zu versetzen, in zwei Hauptgruppen eingeteilt:

- ▶ Strömungspumpen,
- ▶ Verdrängerpumpen.

Die beiden Hauptgruppen untergliedern sich wiederum nach konstruktiven Merkmalen. Abbildung A.6-2 zeigt eine vereinfachte Übersicht über die Klassifizierung der am häufigsten im industriellen Bereich eingesetzten Pumpentypen. Sie bildet jedoch nicht die Gesamtheit aller am Markt verfügbaren Typen ab.

Abbildung A.6-2: Klassifizierung von Strömungs- und Verdrängerpumpen



Quelle: (60)

Für hohe Förder- bzw. Umwälzleistungen mit entsprechend hohem Bedarf an Antriebsenergie werden im industriellen Anwendungsbereich vor allem Kreisel- und Verdrängerpumpen eingesetzt. Nachfolgend werden einige wichtige Auslegungsmerkmale für diese Bauformen beschrieben.

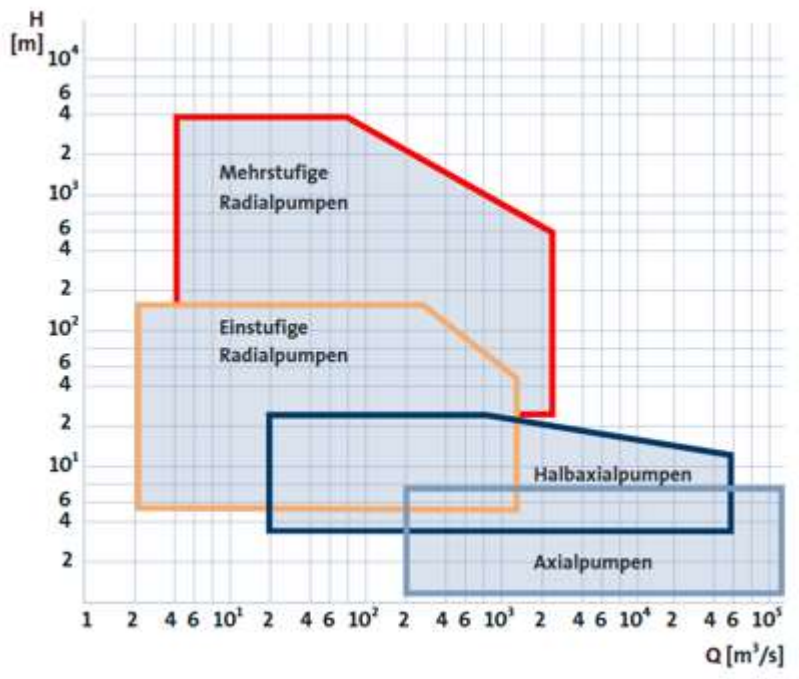
#### Kreiselpumpen

Kreiselpumpen arbeiten auf der Grundlage von Laufrädern, die innerhalb der Flüssigkeit rotieren, um auf die Flüssigkeit eine Kraft auszuüben und diese entsprechend zu beschleunigen. Hauptmerkmal dieser Pumpen ist ein durchgängiger freier Strömungsquerschnitt. Deshalb können diese Pumpen Flüssigkeiten ohne zusätzliche Systemausrüstungen nicht selbst ansaugen. Wesentliche Vorteile von



Kreiselpumpen sind die einfache und kompakte Bauweise, das stetige Förderverhalten und die relativ hohe Drehzahl, die einen Direktantrieb durch einen Norm-Elektromotor gestattet. Die wichtigsten Einsatzbereiche von Kreiselpumpen sind der Wasser- bzw. Abwasserbereich, die chemische Industrie sowie Raffinerieanwendungen (61). Die Einteilung der Kreiselpumpen erfolgt nach mehreren Kriterien. Dabei spielen Laufradform, Antrieb, Gehäuseaufbau, Stufenzahl und das zu befördernde Medium eine Rolle. Je nach geforderter Förderhöhe bzw. -menge werden ein- oder mehrstufige Pumpensysteme verwendet, wie nachfolgende Abbildung A.6-3 zeigt.

Abbildung A.6-3: Typische Betriebsbereiche der Bauarten von Kreiselpumpen



Quelle: (62)

Um Kreiselpumpen herstellungabhängig möglichst vielseitig einsetzbar zu gestalten, wurden einheitliche Standards für Wasser- und Chemienormpumpen geschaffen:

- ▶ EN 733 (63): Kreiselpumpen mit axialem Flüssigkeitseintritt mit einem Nenndruck von 10 bar („Wassernormpumpen“),
- ▶ DIN EN ISO 2858:2011-12 (64): Kreiselpumpen mit axialem Flüssigkeitseintritt mit einem Nenndruck von 16 bar („Chemienormpumpen“).

### Verdrängerpumpen

Verdrängerpumpen fördern das Medium in einem in sich geschlossenen Volumen. Dabei wird durch Trennelemente wie Ventile, Klappen oder Dichtungen der Zeitpunkt des Ein- und Austritts des Fördermediums so gesteuert, dass durch das wechselweise Ansaugen und Verdrängen ein Förderstrom erzeugt wird. Es wird zwischen fester (Konstantpumpe) und einstellbarer Volumenverdrängung (Verstellpumpe) unterschieden. Je nach Bewegung gibt es Konstruktionen mit oszillierenden oder rotierenden Verdrängungskörpern. Typische Anwendungsgebiete von Verdrängerpumpen im industriellen Bereich sind Anlagen mit Bedarf an Druckwasser und -öl (Presspumpe) in der chemischen Industrie (z. B. Dosierpumpe) und in kleineren bis mittleren Industrieanlagen (65) sowie Förderung hoch- und höherviskoser Medien.



Einem großen Spektrum möglicher Förderaufgaben für Pumpen steht eine große Vielfalt an Bautypen und -formen sowie Leistungsgrößen gegenüber, so dass dem Auswahlprozess für die am besten geeignete technische Lösung und Dimensionierung eine große Bedeutung zukommt. Dabei spielt das Kriterium der Energieeffizienz eine wesentliche Rolle, ist jedoch nicht allein entscheidend. In der nachfolgende Tabelle A.6-1 ist die Eignung von Kreiselpumpen und beispielhafter Verdrängerpumpen in Bezug auf einige technisch wichtige Auswahlkriterien dargestellt. Diese Darstellung deckt nicht das gesamte Kriterien- und Bauformenspektrum ab, verdeutlicht aber die Notwendigkeit eines sorgfältigen und dokumentierten Planungsprozesses, um die beste geeignete Techniken für definierte Förderaufgabe zu identifizieren. Effizienzkriterien (Pumpen- und Gesamtwirkungsgrade, Kennlinienverläufe) sind in dieser Aufstellung nicht enthalten, da sich entsprechende Angaben nicht pauschalisiert darstellen lassen.

Tabelle A.6-1: Eignungsbereiche gebräuchlicher Pumpentypen, ergänzt

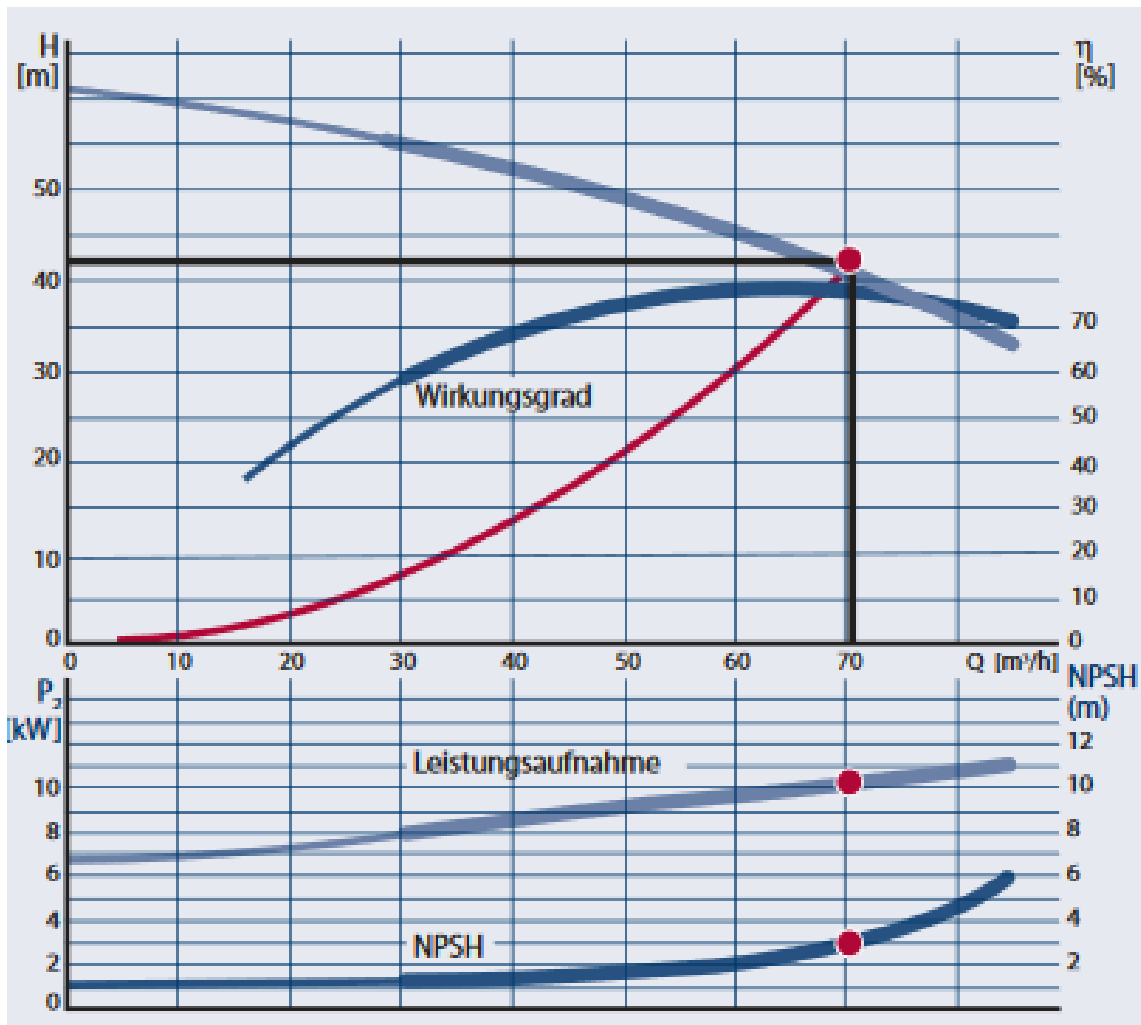
| Auswahlkriterium                 | Kreiselpumpe | Verdrängerpumpen |                   |               |                |
|----------------------------------|--------------|------------------|-------------------|---------------|----------------|
|                                  |              | Drehkolben-pumpe | Kreiskolben-pumpe | Zahnrad-pumpe | Schlauch-pumpe |
| Niedrigviskose Medien            | ✓            | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Hochviskose Medien               | ✗            | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Niedrige Pulsation und Vibration | ✓            | ✓                | ✗                 | ✓             | ✗              |
| Verschleiß & Ersatzteilhaltung   | ✓            | ✓                | ✓                 | ✗             | ✗              |
| Abmessungen                      | ✓            | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Selbstansaugend                  | ✗ (✓)        | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Trockenlaufempfindlichkeit       | ✗            | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Förderdruck (über 16 bar)        | ✗            | ✗                | ✓                 | ✓             | ✗              |
| Drehrichtungsunabhängig          | ✗            | ✓                | ✓                 | ✓             | ✓              |
| Investitionskosten               | ✓            | ✗                | ✗                 | ✓             | ✓              |

Quelle: (66)

Eine eindeutige Zuordnung einzelner Pumpentypen und -bauarten zu speziellen Anwendungsaufgaben ist auf Grund Vielfalt und Komplexität der Anwendungsfälle nicht möglich. Grundsätzlich sollte jedoch die Auswahl der Pumpe so erfolgen, dass diese möglichst nahe an deren Wirkungsgrad-Bestpunkt betrieben werden kann.

Dieses Grundprinzip wird im Folgenden am Beispiel der Kennlinien von Kreiselpumpen verdeutlicht (siehe Abbildung A.6-4). Im Q/H-Diagramm rot dargestellt ist eine beispielhafte Anlagenkennlinie (vergleiche Abbildung A.6-1 mit zugehöriger Beschreibung).

Abbildung A.6-4: Typische Kennlinien einer Kreiselpumpe. Förderhöhe, Leistungsaufnahme, Wirkungsgrad und NPSH (Haltedruckhöhe) werden als Funktion des Förderstroms dargestellt



Quelle: (62)

Wie Abbildung A.6-4 zeigt, weist jede Kreiselpumpe einen Punkt der Wirkungsgradkurve als Maximalpunkt aus. Dieser Punkt des besten Wirkungsgrads trifft nur auf eine bestimmte Förderhöhe und einen dazugehörigen Förderstrom zu. In der Praxis müssen Pumpen meist einen größeren Parameterbereich (Förderhöhe/Förderstrom) abdecken, was bestimmte Kompromisse bei der Auswahl und Dimensionierung erfordert. Daher ist es zweckmäßig, sich an typischen Betriebsbereichen für bestimmte Bauformen (siehe Abbildung A.6-3) zu orientieren. Der Betriebsbereich einer Pumpe ist vornehmlich durch den Wirkungsgradabfall begrenzt. Abhängig vom Verlauf der Wirkungsgradkurve ist in vielen Fällen ein Betrieb der Pumpe zwischen 70 % (Teillast) und 120 % (Überlast) des Auslegungsförderstroms sinnvoll.

Das Förderverhalten von Pumpen (dargestellt als Pumpenkennlinie im G/H-Diagramm) ist stark bauartabhängig. Bei Verdrängerpumpen hängt der Förderstrom hauptsächlich von der Drehzahl ab. Er nimmt bei steigendem Gegendruck nur um so viel ab, wie sich die Drehzahl des Pumpenantriebs aufgrund des höheren Drehmoments reduziert (67). Bei Strömungspumpen (Kreiselpumpen) hingegen ist der Förderstrom neben der Drehzahl auch stark von der Förderhöhe abhängig. Dabei sind die in der Pumpe erzeugte Druckerhöhung und der durch die Pumpe fließende Förderstrom voneinander abhängig. Die maximale Förderhöhe (auch Nullförderhöhe) entsteht, wenn die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil arbeitet. In diesem Punkt entsteht der maximale Pumpendruck. Durch Öffnen des Ventils steigt der Volumenstrom bei abnehmendem Druck (68).

Im Hinblick auf die energieeffiziente Gestaltung von Pumpen gelten über die europäische Rahmengesetzgebung der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG (69) für die am häufigsten eingesetzten Pumpentypen bereits konkrete Anforderungen, die über zwei getrennte EU-Richtlinien formuliert sind:

#### Verordnung (EU) Nr. 547/2012 (70): Anforderungen an Wasserpumpen

Die Verordnung definiert Anforderungen an die Gestaltung üblicher Kreiselpumpen zur Wasserförderung, die als Trockenläuferpumpen ausgestattet sind. Als Trockenläuferpumpe bezeichnet man eine Pumpe mit abgedichteter Wellenverbindung zwischen dem Laufrad im Pumpengehäuse und dem Antriebsmotor, bei der der Antriebsmotor trocken bleibt (20). Der Mindest-Effizienz-Index (MEI) setzt die Messergebnisse der jeweiligen Wasserpumpe in Relation zu dem energieeffizientesten Produkt auf dem Markt (Stand 2010). Die Angaben zum MEI beziehen sich nach auf einen gemittelten hydraulischen Wirkungsgrad  $\eta$  ( $\eta_{Teillast}$ ,  $\eta_{BEP}$  und  $\eta_{Überlast}$ ) bei einer Medientemperatur zwischen -10 und +120 °C.

- ▶ Pumpen müssen seit 01.01.2015 einen **MEI  $\geq 0,4$**  erreichen.
- ▶ Der unverbindliche Referenzwert für die beste auf dem Markt verfügbare Technologie entspricht einem MEI von  $\geq 0,70$ .

Neben den Produktdaten wie Baujahr, Art und Größe des Produkts oder Herstellername und -ort der Wasserpumpe, müssen u. a. folgende Informationen in der technischen Dokumentation bereitgestellt werden:

- ▶ Mindesteffizienzindex (MEI)  $\geq [x,xx]$ ,
- ▶ Standardtext: „Der Referenzwert MEI für Wasserpumpen mit dem besten Wirkungsgrad ist  $\geq 0,70$ “ oder alternativ die Angabe „Referenzwert MEI  $\geq 0,70$ “,
- ▶ hydraulischer Pumpenwirkungsgrad (%) bei korrigiertem Laufraddurchmesser  $[xx,x]$ , alternativ Angaben  $[-,-]$ ,
- ▶ Leistungskurve, einschließlich Effizienzkennlinie der Pumpe.

In Bezug auf die Effizienz der elektrischen Antriebsmotoren dieser Trockenläuferpumpen gelten separate Vorgaben, die im nächsten Abschnitt erläutert werden.

#### Verordnung (EG) Nr. 641/2009 (71): Anforderungen an Nassläufer-Umwälzpumpen

Nassläufer-Umwälzpumpen sind Pumpen, deren Laufrad direkt auf der Motorwelle sitzt und deren Motor in das zu fördernde Medium eingetaucht ist. Für diese Pumpenbauart, die vornehmlich als Umwälzpumpen in Heizungs- und Kühlsystemen eingesetzt werden ist der Energie-Effizienz-Index (EEI) als Bewertungsmaßstab definiert. Der Energie-Effizienz-Index (EEI) ist eine dimensionslose Kennzahl. Der EEI ist das Verhältnis aus berechneter elektrischer Leistungsaufnahme einer Referenzpumpe gleicher hydraulischer Leistung im Nennpunkt und der gewichteten elektrischen Leistungsaufnahme der getesteten Pumpe für ein definiertes Lastprofil, welches mit einem Skalierungsfaktor multipliziert wird. Dieser Skalierungsfaktor soll gewährleisten, dass zum Zeitpunkt seiner Festlegung nur 20 % der Umwälzpumpen eines bestimmten Pumpentyps einen EEI  $\leq 0,20$  aufweisen. Seit 01.01.2015 ist für Nassläuferpumpen ein EEI  $\leq 0,23$  einzuhalten (Stand der Technik). Pumpen mit darüber hinausgehenden EEI sind als beste verfügbare Technik zu verstehen.

#### **A.6.2.4 Motor und Getriebe**

**Hinweis:** Zu diesem Themenfeld liegt ein eigenständiges Kapitel „Elektromotorische Antriebe“ (A.4) vor. Aus diesem Grund wird nachfolgend nur ein kurzer Überblick über die wesentlichsten Anforderungen gegeben. Detailinformationen sind dem Kapitel „Elektromotorische Antriebe“ zu entnehmen.

Ausgehend von einer an die konkrete Förderaufgabe angepassten Pumpendimensionierung ist bei Pumpen mit separatem (nicht geräteintegriertem) Elektromotor ein leistungsmäßig passender Elektromotor auszuwählen, der in einem möglichst guten Wirkungsgradbereich betrieben werden kann.

Mit den Verordnungen Nr. 640/2009 (38) und 4/2014 (72) der Europäischen Kommission (Quellenangaben) wurden verbindliche Ökodesign-Anforderungen für 2 - 6-polige, netzbetriebene Asynchronmotoren (< 1.000 V) im Leistungsbereich zwischen 0,75 und 375 kW definiert. Nicht erfasst sind Motoren entsprechend DIN VDE 5030-30-2:2019-02 (36), die nur mit Frequenzumrichter betrieben werden können (z. B. Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren) sowie 8-polige Asynchronmotoren. Stufenweise gelten u. a. folgende Anforderungen:

- ▶ Ab 1. Januar 2015 müssen Motoren mit einer Nennleistung zwischen 7,5 - 375 kW mindestens das Effizienzniveau IE3 erreichen oder dem Energieeffizienzniveau IE2 entsprechen und mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein.
- ▶ Ab 1. Januar 2017 gelten die genannten Anforderungen auch für Motoren mit einer Nennleistung zwischen 0,75 - 7,5 kW.

**Beste verfügbare Technik sind derzeit Motoren, die die Mindestanforderungen der Ökodesign-Richtlinie Nr. 640/2009 und Nr. 4/2014 überschreiten. Für „klassische“ Drehstrom-Asynchronmotoren sind zahlreiche Produkte mit der Effizienzklasse IE4 marktverfügbar, für Permanentmagnet-Synchronmotoren oder Synchron-Reluktanzmotoren, die am Frequenzumrichter betrieben werden müssen, sind Produkte mit dem Energieeffizienzniveau IE4 und sogar IE5 bereits in einigen Leistungsbereichen marktverfügbar.**

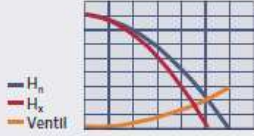
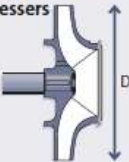
Der Einsatz von Getrieben beschränkt sich bei Pumpensystemen auf Sonderanwendungen und wird somit an dieser Stelle nicht gesondert beschrieben.

#### **A.6.2.5 Steuerung und Regelung**

Eine wesentliche Voraussetzung für einen energieeffizienten Pumpenbetrieb ist eine an das Bedarfsprofil (Lastprofil) angepasste Steuer- und Regelstrategie.

In nachfolgender Abbildung A.6-5 sind die wesentlichsten technischen Möglichkeiten zur Reduzierung der Fördermenge einer Pumpe bei konstanter Anlagenkennlinie und deren Einfluss auf den Energieverbrauch der Pumpe dargestellt. Beispielhaft ist hier die Reduzierung der Fördermenge um ca. 20 % abgebildet. Die Effekte der Regelmechanismen sind als „resultierende Pumpenkennlinie“ (Kombination aus Regelelement wie Bypass oder Drosselventil und Pumpe) im Q/H-Diagramm aufgetragen. Soll eine Pumpe dauerhaft mit einer reduzierten Fördermenge und Förderhöhe betrieben werden bzw. ist keine Pumpe lieferbar, die den geforderten Betriebspunkt exakt abdecken kann, besteht auch die Möglichkeit, den Laufraddurchmesser durch Abdrehen zu verkleinern. Mit einem geringen Wirkungsgradverlust kann hier eine deutliche Energieeinsparung erreicht werden.

Abbildung A.6-5: Regelungsmethoden zur Reduzierung des Förderstroms von Pumpen im Vergleich

| Methode                                                                                                                      | Kontinuierliche Anpassung möglich? | Merkmale der resultierenden Pumpenkennlinie                                                                                          | Gesamtwirkungsgrad des Pumpensystems | Relativer Energieverbrauch bei Reduzierung des Förderstroms um 20% |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Drosselregelung</b><br>                  | Ja                                 | Geringerer Förderstrom Q<br>                        | Erheblich niedriger                  | 94%                                                                |
| <b>Bypassregelung</b><br>                   | Ja                                 | Niedrigere Förderhöhe H und geänderte Kennlinie<br> | Erheblich niedriger                  | 110%                                                               |
| <b>Änderung des Laufraddurchmessers</b><br> | Nein                               | Geringerer Förderstrom Q und Förderhöhe H<br>       | Etwas niedriger                      | 67%                                                                |
| <b>Drehzahlregelung</b><br>               | Ja                                 | Geringerer Förderstrom Q und Förderhöhe H<br>     | Etwas niedriger                      | 65%                                                                |

$H_n$  ursprüngliche QH-Kennlinie der Pumpe

$H_x$  neue QH-Kennlinie nach Regelung (Drossel-, Bypass-, oder Drehzahlregelung sowie Änderung des Laufraddurchmessers)

$H_y$  neue QH-Kennlinie durch Erhöhung der Drehzahl über der Nenndrehzahl der Pumpen

Quelle: (62)

Die Drehzahlregelung mittels Frequenzumrichter ist in den meisten Fällen die energieeffizienteste Methode zur Anpassung des Betriebspunktes von Pumpen an variable Lastanforderungen (Durchfluss, Druckdifferenz). Eine solche Lösung bietet eine Vielzahl von Vorteilen (73):

- ▶ Bei Kreiselpumpen werden Volumenstrom und Druck kontinuierlich regelbar.
- ▶ Bei geschlossenen Systemen, etwa bei Umwälzpumpen gilt, dass sich der Betriebspunkt entlang einer Linie eines weitgehend konstanten und sowie optimalen Wirkungsgrades bewegt.
- ▶ Da sich die hydraulische Leistung proportional zur dritten Potenz der Drehzahl verhält, lassen sich gerade bei Teillastbetrieb erhebliche Energieeinsparungen erreichen.
- ▶ Die Kavitationsgefahr sinkt.
- ▶ Der Anlauf erfolgt sanfter.
- ▶ Es ist keine Blindleistungskompensation erforderlich.

Zur Ermittlung der genauen Energieeinsparung bei Reduzierung der Pumpendrehzahl muss neben dem hydraulischen Wirkungsgrad der Pumpe zudem der Wirkungsgrad des Frequenzumrichters und des Motors berücksichtigt werden. Verallgemeinernd lässt sich feststellen, dass sich ein drehzahlvariabler Antrieb fast immer rentiert, wenn das Lastprofil über die Betriebszeit große Unterschiede ausweist, der Anteil der Reibungsverluste hoch ist und eine stufenweise Regelung mit parallelen Pumpen nicht machbar oder nicht wirtschaftlich ist (67).

Sobald äußere Einflüsse bestimmen, wann Pumpen zu- oder abgeschaltet werden, ist ein Schaltgerät notwendig. Man unterscheidet dabei zwischen niveau-, uhrzeit-, temperatur- oder druckabhängigen Schaltgeräten. Darüber hinaus gibt es verschiedene Fehler- und Zustandsmeldemöglichkeiten, um Pumpe und Steuerung jederzeit flexibel überprüfen zu können. Dabei ist eine messtechnisch unterstützte elektronische Steuerung seit mehreren Jahren Stand der Technik. Anzeigen für Pumpenstrom, Netzspannung und Netzüberwachung gehören ebenso dazu wie Meldezubehör in Form von Blitzleuchten (74).

Gibt es darüber hinaus auch noch analog gemessene äußere Größen, an denen sich die Regelung der Pumpe orientieren soll, wird zusätzlich zur Pumpensteuerung ein elektronischer Frequenzumrichter notwendig. Anwendung finden die folgenden Kombinationsmöglichkeiten von drehzahlgeregelten Pumpen mit Regler und Sensoren zur Messung von Systemparametern:

- ▶ Proportionaldruck-Regelung,
- ▶ Konstantdruck-Regelung,
- ▶ Konstante Kennlinienregelung,
- ▶ Konstanttemperatur-Regelung.

Bei modernen Pumpen macht die selbständige Anpassung der Kennlinie an die Anlagenbedingungen die manuelle Einstellung der Pumpe bei der Installation überflüssig. Verändern sich im laufenden Betrieb die Anlagenbedingungen, berechnet die Pumpenelektronik die neue, ideale Kennlinie und den energieeffizientesten Betriebspunkt. In Kombination mit der Förderstrom-Begrenzung werden nach einem definierten Maximalwert die Förderströme überwacht und begrenzt. Wird der Maximalwert erreicht, wird die Kennlinie entsprechend verändert.

#### **A.6.2.6 Wartung und Instandhaltung**

Um eine dauerhaft optimale Leistung und Energieeffizienz zu erreichen, müssen Pumpensysteme überwacht und in einem guten Zustand gehalten werden. Die Instandhaltung von Pumpensystemen soll systematisch und vorausschauend erfolgen. Hierzu sind die Anlagenkomponenten bereits im Angebotsstadium entsprechend zu spezifizieren und die für die Instandhaltungsplanung notwendigen Daten vom Hersteller/Lieferanten abzufragen (67). Die Instandhaltung beschreibt dabei die Kombination aus:

- ▶ Wartung: Bewahrung des Sollzustandes,
- ▶ Inspektion: Feststellung und Beurteilung des Istzustandes,
- ▶ Instandsetzung: Wiederherstellung des Sollzustandes,
- ▶ Verbesserung: Beseitigung von strukturellen Schwachstellen.

#### Wartung & Inspektion

Zur regelmäßigen Wartung zählt die äußere Pflege der Pumpen und Aggregate sowie die Wartung der Lager und Wellendichtungen. Die notwendigen Angaben zur Art und Umfang von Wartungsarbeiten können aus den jeweiligen Betriebsanleitungen der Systemkomponenten entnommen oder aus den Ergebnissen relevanter Analyse-, Mess- und Inspektionsarbeiten bei bestehenden Anlagen abgeleitet werden. Unter Inspektion versteht man wiederum Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustands der Pumpe. Wichtig für die Beurteilung des Istzustands ist die Kenntnis des Sollzustands. Dazu sollten nach Auslieferung bzw. erfolgreichen Grundüberholung Referenzwerte aufgenommen und systematisch dokumentiert werden (67). Als Beispiel müssen durch das Betriebspersonal bei der Inspektion folgende Punkte regelmäßig geprüft werden:

- ▶ Überprüfen der Laufruhe von Pumpe und Antriebsmaschine,
- ▶ Kontrolle der Motorleistung unter Berücksichtigung der Stromaufnahme,
- ▶ Kontrolle der Kupplungsausrichtung,



- ▶ Überprüfen der elastischen Übertragungselemente auf Verschleiß (z. B. an Kupplungsscheibe, -bolzen und -paketen),
- ▶ Dichtheit von Lager- und Wellendichtungen sowie Flanschverbindungen.

Bei Vernachlässigung der Wartungsarbeiten ist mit erheblichen Instandhaltungskosten zum Beispiel durch übermäßige Abnutzung von Lagern oder Kavitation der Pumpen zu rechnen.

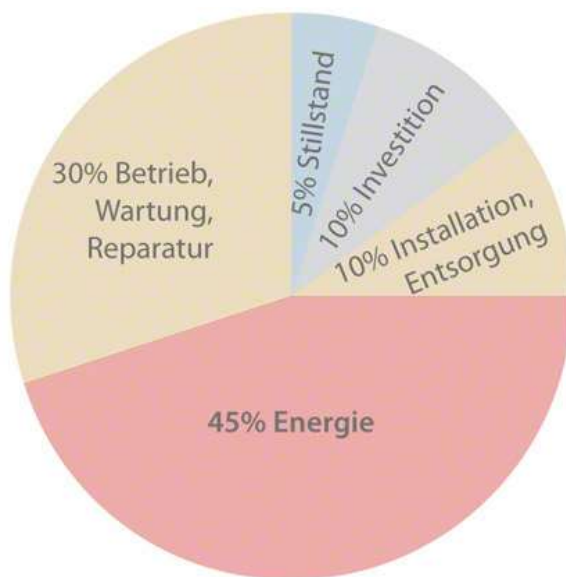
#### Instandsetzung & Verbesserung

Ziel der Maßnahmen der Instandsetzung (auch Reparatur) ist es, die planmäßige Funktionsfähigkeit bzw. den Soll-Zustand einer Anlage oder Maschine wiederherzustellen. Werden bei diesem Vorgang Schwachstellen beseitigt, um die Funktionssicherheit zu erhöhen, ist dies laut DIN 31051 eine Verbesserung. Diese zählt man zu den Instandhaltungsmaßnahmen, wenn dadurch die Funktion der Pumpe nicht verändert wird (67).

#### **A.6.2.7 Lebenszykluskosten von Pumpensystemen**

Betrachtet man die Gesamtkosten des Betriebs eines Pumpensystems über dessen Lebensdauer (Nutzungsdauer) bilden Energiekosten in der Regel den größten Anteil. Nachfolgende Abbildung A.6-6 zeigt eine solche Kostenverteilung für eine beispielhafte Kreiselpumpe.

Abbildung A.6-6: Kostenverteilung einer beispielhaften Kreiselpumpe über deren gesamten Lebenszyklus



Quelle: (75)

Aus oben genanntem Grund ist es sinnvoll, bei Investitionsentscheidungen eine Abwägung zwischen kostenintensiveren aber energieeffizienteren oder preiswerteren Standard-Pumpensystemen zu treffen. Für diesen Fall eignet sich das vom Konsortium Hydraulic Institute, Europump und dem US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT) entwickelte Methodik „Pump Life Cycle Costs“ (76) mit dem die sogenannten Lebenszykluskosten (LCC, Life Cycle Costs) von Pumpensystemen ermittelt und technologische Alternativen miteinander verglichen werden können. Die Lebenszykluskosten eines Pumpensystemes lassen sich wie folgt berechnen:

Formel A.6-1

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d$$

Legende:



|      |                                                                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LCC  | Lebenszykluskosten                                                                                                                         |
| Cic  | Anschaffungskosten (Einkaufskosten von Inbetriebnahme, Planungskosten, Kosten der Qualifizierungsmaßnahmen für das Personal etc.)          |
| Cin  | Installationskosten (Kosten für Einrichtung und Inbetriebnahme)                                                                            |
| Ce   | Energiekosten (Produkt aus Energieverbrauch und dem Energiepreis)                                                                          |
| Co   | Betriebskosten (Überwachung und Diagnose)                                                                                                  |
| Cm   | Instandhaltungskosten (Wartungsarbeiten sowie vorbeugende und korrektive Instandsetzung)                                                   |
| Cs   | Produktionsausfallkosten (Kosten in Folge von Ausfallzeiten und Produktionsverlust)                                                        |
| Cenv | Umweltkosten (Entsorgungskosten von Hilfsstoffen, auszutauschenden Bauteilen und ggf. von nicht verkaufbaren Produkten bei Fehlproduktion) |
| Cd   | Außerbetriebnahmekosten (Kosten für Stilllegung und Entsorgung) (77)                                                                       |

Anhand der dargestellten Methodik wird es Betreibern entsprechender Systeme möglich, die Vorteilhaftigkeit energieeffizienter Technologien zu bewerten. Auslegungssoftware von unterschiedlicher Pumpenhersteller ist bereits mit Programmbausteinen für LCC-Analyse ausgestattet und ermöglicht eine vereinfachte Lebenszyklusbewertung unterschiedlicher Produkte dieser Hersteller.

## A.7 Industrielle Lufttechnik

### A.7.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Industrielle Lufttechnik

#### A.7.1.1 Anwendungsbereich und einsatzbestimmende Eigenschaften

Als industrielle Lufttechnik, oft auch als Prozesslufttechnik bezeichnet, werden in diesem Merkblatt technische Anlagen zur Konditionierung und zum Transport von Luft und Luft-Stoff-Gemischen verstanden. Diese Systeme sind in der Industrie und im Gewerbe weit verbreitet und kommen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Ausführungsformen und Größenordnungen in fast allen Branchen zum Einsatz.

Hauptaufgaben prozesslufttechnischer Anlagen sind:

- ▶ Umwälzen und Verteilen von Luftströmen für prozesstechnische Zwecke,
- ▶ Absaugen von Emissionen aus Arbeitsstätten und Prozessanlagen,
- ▶ Transport von Feststoffen.

Hinweise zur begrifflichen und inhaltlichen Abgrenzung des Themengebietes:

Für Systeme, die zur Schaffung eines definierten Raumklimas in Arbeitsstätten bestimmt sind und insofern eine Kombination der Querschnittstechnologien Beheizung, Feuchteregelung, Be- und Entlüftung, ggf. in Verbindung mit Filterung darstellen, wird an dieser Stelle auf das gesonderte Kapitel Raumluftechnische Systeme verwiesen.

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die mit prozesstechnischen Aufgaben verbundenen lufttechnischen Systeme sowie übergreifende Aspekte der Energieeffizienz bei der Förderung kompressibler gasförmiger Medien. Da in der weitaus überwiegenden Zahl der Anwendungsfälle Luft atmosphärischen Ursprungs den Hauptbestandteil der zu fördernden Volumina ausmacht, wird in der weiteren Darstellung stets der Begriff „Luft“ als Synonym für alle für solche Förderaufgaben in Frage kommenden gasförmigen Medien verwendet.

Der Energieverbrauch einer lufttechnischen Anlage hängt im Wesentlichen von der transportierten Luftmenge, den Druckverlusten im gesamten Fördersystem, der Dichtheit des luftführenden Systems und der Effizienz des Energieeintrags zur Förderung der Luft im Lüftungsgerät ab. Sofern die Enthalpie der Luft genutzt wird, um Wärmeenergie zu transportieren, muss der Bilanzkreis zur Bewertung der Energieeffizienz solcher Systeme ggf. auf die entsprechenden Bereiche der Wärmezufuhr und -abfuhr erweitert werden.

#### A.7.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz von lufttechnischen Anlagen im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes

##### A.7.1.2.1 Abgrenzung zu anderen Prüfaufgaben

Die Aufgaben lufttechnischer Anlagen stehen oft im Zusammenhang mit immissionsschutzfachlichen oder arbeitsschutzfachlichen Belangen, wenn es um die Erfassung, den Transport, die Rückhaltung bzw. Ableitung von luftgetragenen Gefahrstoffen geht. Die vollumfängliche Zweckerfüllung der Anlage für diese Belange wird im Weiteren als prioritär zu beachtende Randbedingung vorausgesetzt, der sich Belange der Energieeffizienz unter Umständen nachrangig unterordnen müssen.

##### A.7.1.2.2 Bagatellschwellenprüfung

Eine spezielle Betrachtung von Energieeffizienzaspekten lufttechnischen Anlagen ist im Rahmen von Genehmigungsverfahren in der Regel nicht erforderlich, wenn der voraussichtliche

Elektroenergiebezug für die Summe der elektrischen Antriebe von lufttechnischen Anlagen < 10.000 kWh/a beträgt.

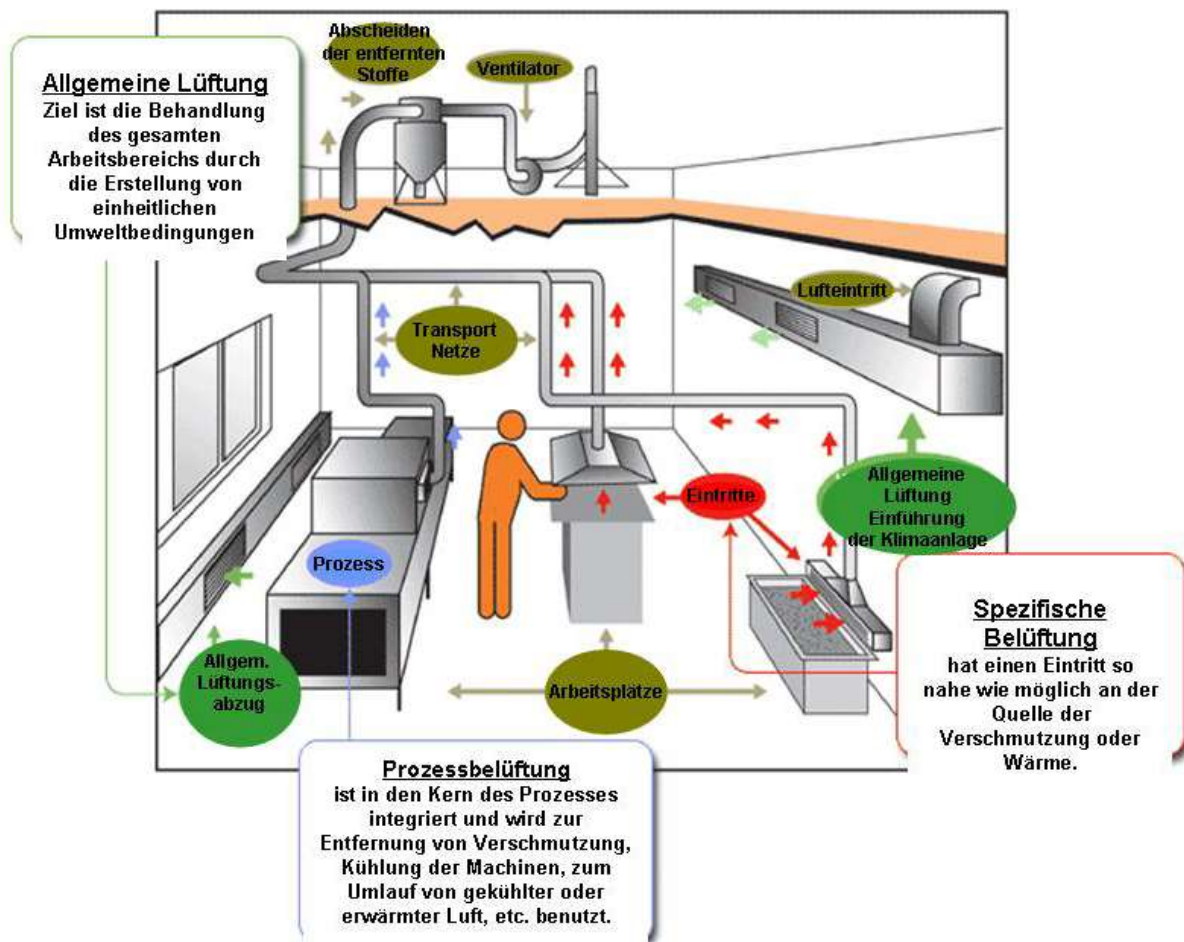
Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

#### A.7.1.2.3 Systembetrachtung

Lufttechnische Systeme sind für viele industrielle Anlagen unbedingt erforderlich, damit sie gut funktionieren. Wie Abbildung A.7-1 veranschaulicht, ist das Spektrum der Anwendungen und Förderaufgaben sehr vielfältig. Grundlegend wird unterschieden in

- ▶ Allgemeine Lüftung (in der Regel auf einen (Arbeits-)Raum als Ganzes bezogen), oft eher RLT-Anlagen (siehe Kapitel A.8) zuzuordnen, ausgenommen Anwendungsfälle, bei denen die Einhaltung von Gefahrstoff-Grenzwerten primärer Aufgabenbestandteil ist,
- ▶ Spezifische Be- bzw. Entlüftung/Absaugung (arbeitsplatzbezogene gezielte Erfassung von Emissionen von Gefahrstoffen und Wärme aus kleinräumigen Quellen zur Verhinderung einer Ausbreitung im gesamten Arbeitsraum, Arbeitsschutz ist primäres Ziel),
- ▶ Prozessbelüftung (Belüftung innerhalb von verfahrenstechnischen Prozessen, primäres Ziel ist eine definierte Arbeitsatmosphäre, um die Produktqualität bzw. die Verfahrensbedingungen zu sichern).
- ▶ Prozessluftversorgung (z. B. für pneumatische Förderung, Verbrennungsluft für Öfen, primäres Ziel ist die Prozessfunktion selbst).

Abbildung A.7-1: Veranschaulichung der verschiedenen Aufgaben lufttechnischer Systeme



Eine wesentliche Voraussetzung für bestmögliche ist die sachgerechte Formulierung der Aufgabenstellung für das Lüftungssystem. Nur dann können die technisch möglichen Effizienzsteigerungen tatsächlich erreicht werden.

Vor einer Auslegung insbesondere spezifischer Lüftungssysteme sollte deshalb zunächst die Frage betrachtet werden, ob sich die abzuführenden Emissionen durch ein geeignetes technisches Verfahren generell vermeiden oder reduzieren lassen, was ggf. zum Entfall der lufttechnischen Aufgabe führen könnte.

Die wesentlichen Bestandteile lufttechnischer Anlagen sind:

- ▶ Luftförderung (Ventilator, Antrieb, Übertragungssystem),
- ▶ Luftführung (Kanäle, Wetterschutzgitter, Dachhauben etc.),
- ▶ Luftverteilung (Zu-, Abluftgitter, Dralldurchlässe),
- ▶ Luftregulierung (Volumenstromregler, Jalousieklappen) sowie Zusatzsysteme wie
- ▶ Luftkonditionierung, (Be- und Entfeuchten, Heizen, Kühlen),
- ▶ Abluft-/Abgasreinigungssysteme (Filter, Wäscher etc.),
- ▶ Schalldämmsysteme,
- ▶ Brandschutzsysteme,
- ▶ Prozesslufttechnische Zusatzsysteme (Abrasionsschutz, Korrosionsschutz).

Der Energieverbrauch einer lufttechnischen Anlage hängt im Wesentlichen von der transportierten Luftmenge, den Druckverlusten im gesamten Fördersystem, der Dichtheit des luftführenden Systems und der Effizienz des Energieeintrags zur Förderung der Luft im Lüftungsgerät ab. Sofern die Enthalpie der Luft genutzt wird, um Wärmeenergie zu transportieren, muss der Bilanzkreis zur Bewertung der Energieeffizienz solcher Systeme ggf. auf die entsprechenden Bereiche der Wärmezufuhr und -abfuhr erweitert werden.

Die Energieeffizienz einer lufttechnischen Anlage wird durch die Qualität der Planung, der Herstellungsprozesse der Komponenten, der Montageprozesse und der Betriebsführung einschließlich Wartung und Instandhaltung beeinflusst. Es ist sinnvoll, die letztgenannten Maßnahmen in ein Energiemanagementsystem einzubetten, in welchem eine regelmäßige Überprüfung des Systems durch eine gute Datenbasis unterstützt wird.

#### **A.7.2 Angaben zu lufttechnischen Anlagen im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung Bagatellschwellen)**

##### **A.7.2.1 Dimensionierung des lufttechnischen Verteilsystems**

Für eine energieeffiziente Auslegung muss zwingend eine Feinplanung des lufttechnischen Verteilsystems erfolgen und entsprechend dokumentiert werden. Diese Planung schließt die Bestimmung der Druckverluste der einzelnen Zu- und Abgänge mit allen Einbauten und den entsprechenden Regelungsstrategien ein. Ziel der Planung ist es, die Erfüllung der Förderaufgabe für alle Betriebszustände bei geringstmöglichem Druckverlust des Gesamtsystems sicherzustellen.

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen hat der Vorhabensträger in der Regel noch keine Detailplanungen mit detaillierter Nutzwärme- und Heizlastberechnung durchgeführt. Diese Planungsschritte werden normalerweise erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sind diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabensträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar.

Dem Stand der Technik entsprechen somit Planungen/Systemauslegungen, welche folgende Grundsätze berücksichtigen:

- ▶ Strömungsgeschwindigkeit im Kanal und Gerät gering halten, insbesondere dann, wenn keine Gefahr von Ablagerungen besteht (partikelfreie Luft),
- ▶ Strömungsquerschnitte ausreichend dimensionieren, Bevorzugung kreisförmiger Leitungsquerschnitte gegenüber rechteckigen
- ▶ Kanalführung möglichst gerade ausführen,
- ▶ Anzahl der Umlenkungen, Verzweigungen etc. auf ein Minimum reduzieren,
- ▶ erforderliche Umlenkungen, Verzweigungen, etc. strömungsgünstig ausführen, d. h., Radien möglichst groß wählen und die Länge flexibler Luftleitungen (Schläuche) minimieren,
- ▶ Strömungsabrisse und Wirbelbildungen durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Leitbleche) vermeiden.

Beste verfügbare Technik für die Planung aller komplexeren lufttechnischen Anlagen ist die Bearbeitung durch qualifizierte Fachplaner in Verbindung mit der Anwendung entsprechender Planungssoftware. Der Volumenstrom als maßgebliche Einflussgrößen der Energieeffizienz ist hinsichtlich Qualität und Quantität nachvollziehbar zu ermitteln.

#### **A.7.2.2 Dichtigkeit des Lufttechnischen Systems**

Ein weiterer wichtiger Parameter für die Energieeffizienz lufttechnischer Anlagen ist die Dichtigkeit der luftführenden Systemkomponenten, insbesondere der Luftleitungen/Kanäle. Die auf diese Falschlufmengen entfallende Förderleistung des Ventilators ist als Energieverlust zu bewerten. 10 % Falschluf entsprechen ungefähr einem 33 % höheren Energiebedarf für die Luftförderung (78).

Bereits in der Planung muss deshalb eine ausreichende Dichtheitsklasse z. B. nach DIN EN 16798-3 (79) festgelegt werden. Dichtheitsklasse C wird gemäß DIN EN 16798-3 als Standardwert für Luftverteilungsanlagen empfohlen. Möglichst bereits in der Einbauphase soll vor Ort eine Dichtheitsprüfung nach DIN EN 12599 (80) durchgeführt werden.

Bei Übergabe der Anlage vom Bauunternehmen an den Betreiber muss eine vollständige Dokumentation übergeben werden. Dazu gehören u. a. Vollständigkeitsprüfungs-, Funktionsprüfungs- und Funktionsmessungsprotokolle gemäß DIN EN 12599.

#### **A.7.2.3 Einbauten zur Gefahrstoffentfernung aus dem Luftstrom und zur Konditionierung der Luft**

Bei vielen Anwendungen der Prozesslufttechnik sind zwischen dem Eintritt von Luft in das System und dem Austritt aus dem System eine oder mehrere Einbauten zu durchströmen, welche eine Veränderung der Luftqualität bezwecken. Typische Aufgaben dieser eingebauten Systeme sind

- ▶ Abscheidung von Staub und Aerosolen (meist über speichernde bzw. abreinigbare Filtersysteme oder Schwerkraftabscheider),
- ▶ Abscheidung von gasförmigen Gefahrstoffen (meist über Wäscher oder reaktive bzw. adsorbierende Filter),
- ▶ Änderung der Temperatur des Luftstroms (Wärmeübertrager),
- ▶ Be- oder Entfeuchtung des Luftstroms,
- ▶ Schalldämpfung.

Speziell unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz sind diese Einbauten auf Grund des von ihnen verursachten Druckverlustes relevant. Sofern hinsichtlich der zu erreichenden verfahrenstechnischen Wirkung (=primäres Auswahlkriterium!) mehrere gleichwertige Alternativen verfügbar sind, sollen die Systeme/Komponenten mit dem geringsten zusätzlichen Druckverlust ausgewählt werden.

Stand der Technik ist es, die Auswahl der Filter unter dem Gesichtspunkt der Lebenszykluskosten vorzunehmen. Folgende Zusammenhänge sind unter Effizienzgesichtspunkten besonders wichtig:

- ▶ Längere Standzeiten führen zu niedrigeren Wartungskosten.

- Ein über die Betriebszeit langsamer ansteigender Druckverlust führt zu geringeren Energiekosten.

Daher sind allein auf den Anschaffungskosten basierende Auswahlentscheidungen oft nicht die wirtschaftlichsten Lösungen (81).

#### A.7.2.4 Auswahl des Ventilators

Der Auswahl von Ventilator-Bauart, Größe bzw. Leistung sollte eine exakte Berechnung des Druckverlustes im Kanalsystem und des benötigten Volumenstroms an den Absaug- bzw. Belüftungsorten zu Grunde liegen. Zusätzlich müssen eventuell erforderliche Systeme zur Gefahrstoffentfernung oder sonstigen Konditionierung des Luftstroms berücksichtigt werden.

Welcher Ventilator am effizientesten ist, hängt nicht nur von der Technik des Antriebsmotors (siehe Kapitel A 2.4) ab, sondern auch vom Laufrad und von der Bauform des gesamten Ventilators.

Die wichtigsten Bauformen von Ventilatoren in der industriellen Lufttechnik sind:

- Radialventilatoren mit vorwärts oder rückwärts gekrümmten Schaufeln, (letztere nach dem Stand der Technik besonders häufig eingesetzt, auch als freilaufende Räder),
- Seitenkanalverdichter,
- Diagonalventilatoren,
- Querstromventilatoren.
- Axialventilatoren.

Mit Radialventilatoren und Seitenkanalverdichter können wesentlich höhere Druckdifferenzen überwunden werden im Vergleich zu Axialventilatoren. Diagonal- und Querstromventilatoren liegen hinsichtlich der erreichbaren Druckdifferenz zwischen Radial- und Axialventilatoren.

In der Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 (82) werden die Anforderungen an die energieeffiziente Gestaltung von Ventilatoren mit einer elektrischen Eingangsleistung zwischen 125 W und 500 kW definiert. Das darin definierte Kriterium für die Energieeffizienz von Ventilatoren ist der Systemwirkungsgrad bzw. Gesamtenergieeffizienz, der sich aus den Wirkungsgraden des Ventilators, des Motors und der Steuerungselektronik zusammensetzt.

Die Anforderungen wurden per 1. Januar 2015 in einer zweiten Stufe nochmals angehoben (siehe Tabelle A.7-1).

Tabelle A.7-1: Ab 2015 geltende Wirkungsgrade für Ventilatoren gemäß Ökodesign-Richtlinie Nr. 327/2011 Angabe der Stützwerte\*

| Ventilorkategorie                                                                          | Mess-kategorie (A–D) | Ventilator-druck  | Leistungsbereich > 0,125 kW<br>Wirkungsgrade | Leistungsbereich > 10 kW<br>Wirkungsgrade | Leistungsbereich > 500 kW<br>Wirkungsgrade |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Axialventilator                                                                            | A, C<br>B, D         | statisch<br>total | 28<br>46                                     | 40<br>58                                  | 43<br>61                                   |
| Radialventilator mit vorwärtsgekrümmten Schaufeln und Radialventilator mit Radialschaufeln | A, C<br>B, D         | statisch<br>total | 32<br>37                                     | 44<br>49                                  | 47<br>52                                   |
| Radialventilator mit rückwärtsgekrümmten Schaufeln<br><b>ohne</b> Gehäuse                  | A, C                 | statisch          | 42                                           | 62                                        | 66                                         |
| Radialventilator mit                                                                       | A, C                 | statisch          | 41                                           | 61                                        | 65                                         |



| Ventilorkategorie                         | Mess-<br>kategorie<br>(A–D) | Ventilator-<br>druck | Leistungsbereich<br>> 0,125 kW<br>Wirkungsgrade | Leistungsbereich<br>> 10 kW<br>Wirkungsgrade | Leistungsbereich<br>> 500 kW<br>Wirkungsgrade |
|-------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| rückwärtsgekrümmten Schaufeln mit Gehäuse | B, D                        | total                | 44                                              | 64                                           | 68                                            |
| Diagonalventilator                        | A, C                        | statisch             | 30                                              | 50                                           | 54                                            |
|                                           | B, D                        | total                | 42                                              | 62                                           | 66                                            |
| Querstromventilator                       | B, D                        | total                | 16                                              | 21                                           | 21                                            |

\* Zwischen den benannten Stützwerten ist der Mindestwirkungsgrad über eine jeweils in (82) vorgegebene Interpolationsformel zu berechnen.

Quelle: (82)

#### A.7.2.5 Motor und Getriebe

Die Leistungsübertragung an den Ventilator kann entweder direkt vom Motor oder indirekt mit einer Drehzahlübersetzung erfolgen.

Aus Sicht der Energieeffizienz sind direkte Antriebe stets zu bevorzugen. Die Energieverluste bei indirekter Kraftübertragung können bis zu 20 % betragen und müssen bei der Motorenauswahl berücksichtigt werden. Die Notwendigkeit einer indirekten Übertragung kann aber durch Randbedingungen der Anwendungsaufgabe, z. B. Ex-Schutz/Brandschutz, vorgegeben sein (83).

Für den Antrieb von Ventilatoren, vor allem mit hohen Benutzungsstundenzahlen, sind hocheffiziente Motoren zu bevorzugen, siehe dazu Kapitel A.7.2.4.

#### A.7.2.6 Steuerung und Regelung lufttechnischer Anlagen

Die Regelung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Energieeffizienz und den Lebenszyklus. Viele Anwendungen benötigen keine konstante Leistung, sondern nur in relativ wenigen Betriebsstunden die maximale Auslegungsleistung. Ein effizienter Betrieb ist nur in Kombination mit übergeordneten Steuerungen und Leitsystemen zu erreichen. Die Wahl der energieeffizientesten Regelstrategie ist insbesondere von einer gut ermittelten Anlagenkennlinie abhängig.

Mechanische Regelungen wie Drossel, Bypass- und Drallregelung sind nicht mehr Stand der Technik.

Beste verfügbare Technik zur Regelung variabler Volumenströme sind in den meisten praktischen Anwendungsfällen Drehzahlregelungen der Antriebsmotoren (siehe Kapitel A7.2.4). Bei Axialventilatoren ist bei der Forderung nach einem großen Variationsbereichen des Volumenstroms auch eine Laufschaufelregelung eine energieeffiziente Lösung.

#### A.7.2.7 Wartung, Instandhaltung, Monitoring

Für Anlagen der industriellen Lufttechnik gelten hinsichtlich Wartung, Instandhaltung und energiebezogenem Monitoring grundsätzlich die gleichen Aussagen wie im Kapitel A 2.8.7.

Insbesondere Luftfilter sind Komponenten, bei denen infolge ihrer verfahrenstechnischen Funktion (Rückhaltung von Gefahrstoffen) während der Betriebszeit der Druckverlust zunimmt. Der regelmäßigen Überwachung und Wartung, z. B. durch rechtzeitigen Austausch von beladenem Filtermaterial, kommt deshalb eine große Bedeutung zu.



## **A.8 Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage <Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systems**

### **A.8.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Heizungs- Lüftungs- und Klimaanlage**

#### **A.8.1.1 Anwendungsbereich von Heizungs- Lüftungs- und Klimaanlage und einsatzbestimmende Eigenschaften**

Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage stellen wichtige technische Komponenten für die zweckmäßige Nutzung von IED-Anlagen dar, auf die oft ein erheblicher Anteil am gesamten Energieverbrauch der Anlage entfällt. Heizung, Lüftung und Klimatisierung wird im Folgenden als eine Querschnittstechnologie behandelt, obwohl es sich dabei streng genommen um eine Kombination mehrerer verschiedener Querschnittstechnologien, nämlich insbesondere

- ▶ Wärmeerzeugung und -verteilung,
- ▶ Kälteerzeugung und -verteilung sowie Wärmeübertragung (Heizung bzw. Kühlung incl. sogenannte Rückgewinnungssysteme),
- ▶ Lüftungssysteme (Förderung und Verteilung von Luftströmen),
- ▶ Pumpensysteme (Förderung und Verteilung von flüssigen Medien)

handelt, für welche teilweise auch noch gesonderte Fachkapitel dieser Vollzugshinweise vorliegen. Der Fokus der folgenden Darstellung liegt deshalb auf den Effekten, welche sich durch Schnittstellen zwischen den Einzeltechnologien sowie deren Kombination und äußeren Randbedingungen ergeben.

Anlagen zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung im Sinne dieses Kapitels werden insbesondere eingesetzt, um das Innenraumklima für Arbeitsbereiche in geschlossenen Räumen zu konditionieren.

Die folgenden Darstellungen konzentrieren sich auf die Funktionen Beheizung, Kühlung sowie Lüftung/Klimatisierung von Gebäuden, in denen sich relevante Arbeitsstätten innerhalb von IED-Anlagen befinden können, beispielsweise Produktionshallen oder klimatisierte Lagerbereiche. Die dafür verwendeten technischen Anlagen werden auch als raumlufttechnische Anlagen bezeichnet.

Für ausschließlich prozessrelevante Klimatisierung, z. B. innerhalb von Maschinen und Anlagen, sind oft andere Parameterbereiche und Zielgrößen für die Luftqualität relevant. Diese Besonderheiten werden im Kapitel Industrielle Lufttechnik dargestellt, das sich speziell prozesslufttechnische Anlagen widmet.

#### **A.8.1.2 Qualitative und quantitative Relevanz von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes**

##### **A.8.1.2.1 Abgrenzung zu anderen Prüfaufgaben**

Speziell für Feuerungsanlagen als Bestandteil von Heizungssystemen können immissionsschutzfachliche Prüfkriterien vorliegen.

Für Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage, die häufig unmittelbar zur Gebäudeinfrastruktur gehören, sind bei der Errichtung neuer Gebäude bzw. dem wesentlichen Um- und Ausbau vorhandener Gebäudesubstanz die entsprechenden gesetzlichen Vorgaben zur Energieeffizienz von Gebäuden, insbesondere sich ergebend aus der Energieeinsparverordnung (EnEV) bzw. künftig dem Gebäudeenergiegesetz, zu beachten.

Weil für die Beachtung dieser gesetzlichen Vorschriften in Genehmigungsverfahren bereits umfangreiche verwaltungsfachliche Regeln existieren, wird an dieser Stelle nicht darauf eingegangen.

#### A.8.1.2.2 Bagatellschwellenprüfung

Zusätzlich zur ohnehin in Vorschriften (siehe Kapitel A.8.1.2.1) geregelten Prüfungen bezüglich technischer Gebäudeausrüstung und wärmeschutztechnischer Anforderungen ist eine spezielle Betrachtung von Energieeffizienzaspekten bei Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage ist im Rahmen von Genehmigungsverfahren in der Regel nicht erforderlich, wenn

- ▶ der voraussichtliche Endenergieaufwand aus Brennstoffen und Fernwärme  $< 100.000 \text{ kWh/a}$ ,
- ▶ der voraussichtliche Elektroenergiebezug für die Summe der elektrischen Aggregate von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage  $< 10.000 \text{ kWh/a}$  beträgt.

Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

#### A.8.1.2.3 Systembetrachtung

Zur Bewertung der Effizienz solcher Systeme sind zahlreiche Randbedingungen zu beachten, die wichtigsten davon sind:

- ▶ Nutzungsart der Räume (z. B. Büro, Produktionshalle, Werkshalle, Kühlraum),
- ▶ klimatische Bedingungen am Standort (z. B. wesentliche Unterschiede zwischen Küsten- und Gebirgsregionen),
- ▶ konstruktive Randbedingungen der Gebäudehülle und der Innenausbauten,
- ▶ Qualität und Alter der Gebäudehülle (Wärmedurchgangskoeffizient der einzelnen Bauteile, Wärmebrücken, Undichtigkeiten usw.).

Nachfolgend wird nur ausnahmsweise auf technologische Details von Einzelkomponenten wie Feuerungen, Pumpen und Ventilatoren eingegangen. Für diese Einzelkomponenten sind ergänzend die Fachkapitel der jeweiligen Querschnittstechnologie heranzuziehen. Ausnahmen sind insbesondere dann gegeben, wenn sie Technologien betreffen, die nicht in die Systematik der anderen Fachkapitel fallen.

Auf Grund der hohen Abhängigkeit des Energieeinsatzes für Heizung, Lüftung und Klimatisierung von der Nutzungsart spielen zum Erreichen der besten verfügbaren Technik die methodischen Aspekte

- ▶ qualifizierte Planung,
- ▶ bedarfsgerechte Betriebsführung und
- ▶ fachgerechte Instandhaltung

eine entscheidende Rolle.

Obwohl die benannten Funktionen Heizen, Kühlen sowie Lüften/Klimatisieren oft in Systemlösungen einer Raumlufthechnischen Anlage miteinander verbunden sind, erfolgt die Beschreibung aus Gründen der Übersichtlichkeit und Systematik in getrennten Teilkapiteln.

Eine qualifizierte Planung und Optimierung von Neu- und Bestandsanlagen zur Raumlufthechnik für Arbeitsbereiche setzt für alle relevanten Teilfunktionen eine hinreichende Analyse der Versorgungsaufgabe, ggf. der Bestandssituation und der Rahmenbedingungen voraus. Methodisch ist es zweckmäßig, die Systemauslegung in entgegengesetzter Richtung des Energieflusses vorzunehmen. Dementsprechend sind für eine bedarfsgerechte Systemkonfiguration und einen langfristig energieeffizienten Betrieb folgende Teilaufgaben zu berücksichtigen:

1. Analyse des Bedarfs in der Anwendungsebene (Temperatur, Luftqualität, usw.),
2. Übergabeeinrichtungen (Zu- bzw. Abführung von Wärme, Kälte, Luft) in den jeweiligen Arbeitsbereichen,

3. Verteilsysteme incl. Förderanlagen (Wärme, Kälte, Luft) und Vorgaben für die Dämmung von Verteilleitungen,
4. Erzeugungs- und Konditionierungsanlagen: Kriterien für die Auswahl und Dimensionierung,
5. Steuerung, Regelung, Energiedatencontrolling,
6. Instandhaltung.

### **A.8.2 Angaben zu Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung Bagatellschwellen)**

#### **A.8.2.1 Heizsysteme**

##### **A.8.2.1.1 Ermittlung des Nutzwärmebedarfes**

Der Nutzwärmebedarf ist definiert als rechnerisch ermittelter Wärmebedarf, der zur Aufrechterhaltung der festgelegten thermischen Raumkonditionen innerhalb einer Gebäudezone während der Heizzeit benötigt wird. Bei unterschiedlichen konstruktiven Aufbauten und/oder Nutzungen innerhalb von Gebäudekomplexen ist es notwendig, jeweils gleichartige Teilabschnitte des Gebäudes zu Zonen zusammen zu fassen. Auf der Grundlage der Zonenfestlegungen und Nutzungsarten ist unter Einbeziehung weiterer Randbedingungen, wie Außentemperaturen, Nutzungsintensität sowie Wärmequellen- und -senken der Nutzwärmebedarf mit einer geeigneten Methode (z. B. dem Monatsbilanzverfahrens (84)) zu ermitteln. Ein genormtes Berechnungsverfahren für die darauf aufbauende Auslegungs-Heizlast ist in der europäischen Norm DIN EN 12831 (85) dargelegt.

Beste verfügbare Technik zum Erreichen einer hohen Energieeffizienz im Bereich der Heizsysteme schließt auch die Berücksichtigung von Einflussgrößen und Randbedingungen für die Minimierung des Nutzwärmebedarfs ein, insbesondere

- ▶ die Minimierung der Wärmeverluste (z. B. Dämmung der Gebäudehülle),
- ▶ Begrenzung der Innenraumtemperatur auf das erforderliche Niveau,
- ▶ Minimierung der offenen Zeiten von Fenstern, Türen und Toren usw.,
- ▶ Einsatz effizienter Wärmerückgewinnungssysteme in Verbindung mit technischen Be- und Entlüftungsanlagen für Räume mit hohen kontrollierten Luftwechselraten,
- ▶ gezielte Nutzung der Möglichkeiten der Bauteilaktivierung (Nutzung der Wärmespeicherkapazität massereicher Gebäudekomponenten, wie z. B. Betonelementen/-fundamenten/-decken). Die Bauteilaktivierung wird zukünftig eine immer größere Bedeutung bekommen, da hiermit eine teilweise Entkopplung von Betriebszeiten der Wärmeherzeugung und Bedarfszeiten zur Raumbeheizung möglich ist;
- ▶ darüber hinaus sind Funktionen der Sektorkopplung im Rahmen des Regelenergiemanagements möglich. Beispielsweise kann mit Wärmepumpen in Verbindung mit Bauteilaktivierung der Strombezug zeitlich flexibel und stromnetzdienlich gesteuert werden.

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen hat der Vorhabensträger in der Regel noch keine Detailplanungen mit detaillierter Nutzwärme- und Heizlastberechnung durchgeführt. Diese Planungsschritte werden normalerweise erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Daher ist es zielführender, dem Antragsteller angemessene Prüf- und Dokumentationsauflagen zu erteilen, welche bis zur Inbetriebnahme der Anlage zu erfüllen sind. In der Regel sind diese Auflagen durch den sowieso durch den Vorhabensträger oder dessen Beauftragte durchzuführenden qualifizierten Planungsprozess ohne signifikanten Mehraufwand erfüllbar.

##### **A.8.2.1.2 Wärmeübergabe**

Als Wärmeübergabe ist der unmittelbare Wärmeenergieeintrag in den zu beheizenden Raum definiert. Dabei sind praktisch zwei physikalische Grundprinzipien von Bedeutung:

- ▶ Konvektiver Wärmeeintrag (Zuführen von erwärmter Luft),
- ▶ Wärmestrahlung.

Konvektive Wärmeeinträge (z. B. über Lufterhitzer) sind insbesondere dann vorteilhaft anwendbar, wenn:

- ▶ die Raumluft auf Grund hygienischer oder technologischer Anforderungen gezielt auf mehrere Parameter (Temperatur, Feuchte, Reinheitsgrade) eingestellt werden muss,
- ▶ der Raumluftinhalt auf Grund hygienischer oder technologischer Anforderungen durch relativ große Mengen Frischluftanteile ersetzt werden muss (hohe Luftwechselzahlen),
- ▶ niedrige Raumhöhen und komplexe, großvolumige Einbauten in den Räumen vorhanden sind,
- ▶ bei nur zeitweise benutzten Arbeitsbereichen eine schnelle Aufheizung der Raumluft erforderlich ist,
- ▶ regelmäßig Abwärme mit niedriger Temperatur als Ressource für Heizenergie verfügbar ist, z. B. von Kompressorenanlagen.

Wärmestrahlungsbasierte Heizsysteme wie Hellstrahler, Dunkelstrahler oder Deckenstrahlplatten und andere Flächenheizungen erreichen gegenüber konvektiven Heizsystemen ein vergleichbares Behaglichkeitsempfinden von Personen bei deutlich niedrigerer mittlerer Raumlufttemperatur. Wenn der Heizzweck primär auf die Behaglichkeit von Personen ausgerichtet ist, sind wärmestrahlungsbasierte Heizsysteme deshalb meist energieeffizienter, weil sie den gleichen Nutzen mit geringerem Endenergieeinsatz erreichen.

Typische Anwendungen von Strahlungsheizungen in Industriehallen benötigen im Vergleich zu konvektiven Heizungen 20 - 30 % weniger Endenergie bei gleichem Wärmekomfort in den Arbeitsbereichen.

#### A.8.2.1.3 Wärmeverteilung und Wärmeerzeugung

Wärmeverteilung findet im gebäudetechnischen Bereich in der Regel in Rohrleitungssystemen statt. Stand der Technik zum Erreichen einer bestmöglichen Energieeffizienz sind in der Regel softwaregestützte Planungen, welche

- ▶ zu minimalen rohrinternen Druckverlusten und somit der benötigten Pumpenleistung,
- ▶ zu minimalen Wärmeverlusten, einerseits durch ausreichende Rohrdämmungen mindestens außerhalb zu beheizender Räume, andererseits durch möglichst niedrige Systemtemperaturen

führen. Angaben über die Planungskriterien von Wärmeverteilsystemen finden sich in der europäischen Norm DIN EN 12828 (86).

Niedrige Rücklauftemperaturen von weniger als 57 °C (mit Erdgaseinsatz) bzw. 47 °C (bei Heizöleinsatz) ermöglichen außerdem die Ausnutzung des Brennwerteffekts bei Wärmeerzeugern. Auch die Effizienz von Wärmepumpen steigt mit sinkenden Systemtemperaturen deutlich.

Die beste verfügbare Technik der technischen Komponenten zur Endenergieumwandlung in Wärme (Wärmeerzeuger) differenziert sich sowohl nach Technologieklassen als auch nach Endenergieträgern. Welcher Wärmeerzeuger im konkreten Anwendungsfall jeweils die aus energetischer Sicht beste verfügbare Technik ist, hängt von vielen Rahmenbedingungen ab und kann besonders im Nichtwohnbereich nicht allgemeingültig festgelegt werden. Die Entscheidung muss individuell auf Grundlage einer ingenieurtechnischen Fachplanung getroffen werden.

### **A.8.2.2 Kühlung**

#### **A.8.2.2.1 Ermittlung des Kühlbedarfs**

Der Kühlbedarf von Gebäuden bzw. Zonen und Räumen innerhalb baulicher Anlagen ergibt sich in der Regel analog zum Heizbedarf aus der Vorgabe einer Raumtemperatur im jeweiligen Nutzungsbereich, wenn zur Einhaltung der Temperatur überschüssige Wärme aus dem Nutzungsbereich abgeführt werden muss. Bei der Bestimmung des Kältebedarfs eines Gebäudes oder Gebäudekomplexes geht man analog zur Bestimmung des Wärmebedarfs vor (siehe Kapitel A.8.2.1.1). Für den Heiz- und den Kühlfall gelten jedoch in der Regel unterschiedlicher Rahmenbedingungen (z. B. Außentemperaturen, unterschiedliche Gebäudezonen bzw. Räume), weshalb die Bestimmung von Heiz- und Kühlbedarf nicht in einem Schritt durchgeführt werden kann. Die Durchführung separater Bilanzierungsverfahren zur Bestimmung der Bedarfe ist daher notwendig (84).

Beste verfügbare Technik bedeutet insbesondere die Durchführung einer entsprechenden systematischen, dokumentierten Analyse der jeweiligen Nutzungsbereiche, um den durch Kühlung zu erreichenden Wärmeentzug durch Vermeidung unnötiger Wärmeeinträge zu minimieren.

#### **A.8.2.2.2 Wärmeentzug aus den Nutzungsbereichen**

Die für die industrielle Praxis wesentlichen Grundprozesse sind:

- ▶ Zuführen von kalter und Abführen erwärmter Luft (Luftaustausch),
- ▶ Flächenkühlung/Bauteilaktivierung.

Die einfachste und energieeffizienteste Art der Raumkühlung ist der Austausch von Raum- und Außenluft, sofern letztere eine niedrigere Temperatur aufweist. Es sollte stets geprüft werden, dieses ggf. saisonal unterschiedliche Potenzial zumindest teilweise zu nutzen, bevor energieintensivere technische Maßnahmen zur Raumkühlung ergriffen werden.

Auch die Nutzung des thermischen Speichervermögens der Gebäudehülle kann zur Ausweitung dieses Potenzials in Betracht gezogen werden (Verstärkte Nachtkühlung) (87).

Reicht der Luftaustausch mit der Außenluft nicht für alle abzudeckenden Fälle aus, ist einer Kühlung der Zuluft und/oder von Bauteilen durch technische Anlagen mit Hilfe eines Kühlmediums erforderlich. Die Technologie der Rückkühlung des Kühlmediums ist oft der für die Energieeffizienz des Kühlsystems bedeutendste Systemteil (siehe Kapitel A.8.2.2.3).

#### **A.8.2.2.3 Kälteverteilung und Kälteerzeugung**

Analog der Gestaltung von Wärmeverteilsystemen wird die energieeffiziente Auslegung des Verteilsystems für Kühlmedien bestimmt durch

- ▶ die Minimierung der Antriebsenergie für die Umwälzung des Kühlmediums durch Druckverlustminimierung,
- ▶ Minimierung zusätzlicher Wärmeeinträge, u. a. durch geeignete Antriebsaggregate sowie ausreichende Rohrleitungsdämmung in nicht zu kühlenden Abschnitten.

Welche Technologie der Kälteerzeugung für den jeweiligen Einsatzfall die beste verfügbare Technik darstellt, sollte durch eine fachgerechte ingenieurtechnische Planung ermittelt werden. Verfügbare technische Systeme zur Kälteerzeugung sind:

- ▶ Kompressionskältemaschinen,
- ▶ Absorptionskältemaschinen und
- ▶ Adsorptionskältemaschinen.

Im Sinne einer hohen Energieeffizienz bei Kompressionskältemaschinen sind Aggregate mit möglichst hohen Nennkälteleistungszahlen EER (energy efficiency ratio)

Formel A.8-1

---

$$EER = \frac{\text{Verdampferwärmestrom}}{\text{Verdichterantriebsleistung}} \rightarrow [EER] = 1 \frac{kW_{th}}{kW_{el}}$$

auszuwählen. Der Einsatz von Ab- und Adsorptions-Kältemaschinen ist zu bevorzugen, wenn sie in Verbindung mit bestehenden Abwärmepotenzialen (z. B. aus Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung oder Prozessabwärme) zum Einsatz kommen (88).

Es ist beste verfügbare Technik, die Rückkühlung des Kühlmediums durch Technische Kälteerzeugungsanlagen nur dann einzusetzen, wenn eine freie Kühlung nicht ausreichend oder gar nicht möglich ist.

#### *Freie Kühlung*

Unter freier Kühlung versteht man ganz allgemein die Nutzung der Umgebungstemperatur bzw. -luft zur direkten oder indirekten Kühlung von Prozessen und Räumen.

Man unterscheidet zwischen direkter (Luftaustausch, siehe Kapitel A.8.2.2.2) und indirekter Freikühlung.

Als Indirekte Freikühlung bezeichnet man die Nutzung der Umgebungsluft zur Ab- bzw. Vorkühlung bestehender Kühlsysteme (Effizienzsteigerung). Als gängigen Bauformen sind hierbei:

- ▶ Freikühlung mit Rückkühlwerken im Alternativ- oder Parallelbetrieb zur Kältemaschine (87),
- ▶ Freie Kühlung mit luftgekühlten Kältemaschinen mit integrierten Freikühlregistern (87).

Bei günstigen Standortbedingungen können auch Systeme auf Basis *geothermischer Kühlung* (Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke) bzw. *Grund- oder Oberflächenwasserkühlung* (Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser als Wärmesenke) zum Erreichen einer hohen Energieeffizienz dienen.

### **A.8.2.3 Lüftung und Klimatisierung (Raumlufttechnische Anlagen)**

#### **A.8.2.3.1 Ermittlung des Lüftungsbedarfs**

Der Luftdurchsatz ist eine entscheidende, den Energieverbrauch beeinflussende Kenngröße. Je geringer der Luftdurchsatz ist, umso geringer der Energieverbrauch. Die Bestimmung des Lüftungsbedarfs bzw. das Vorgehen bei der Auslegung von Lüftungsanlagen in Nichtwohngebäuden wird durch die europäische Norm DIN EN 16798-3 (89) beschrieben.

Um ein Lüftungssystem energieeffizient zu planen, ist darauf zu achten (90), dass:

- ▶ der Bedarf richtig bestimmt wird (keine Über- oder Unterdimensionierung),
- ▶ die einzelnen Komponenten einen hohen Energieeffizienzstandard erfüllen,
- ▶ das Zusammenspiel der Systemkomponenten (Gesamtsystem) aufeinander abgestimmt ist, dies schließt ausdrücklich die Integration von Heiz- und/oder Kühlsystemen ein.

#### **A.8.2.3.2 Luftförderung und Luftleitung**

Die zentrale technische Komponente zur Förderung von Luftströmen sind Ventilatoren (auch Gebläse genannt). Ventilatoren sind entscheidende Energieumwandlungskomponenten zur Beschleunigung/Förderung von Luftströmen in technischen Anlagen. Ihr Typ, ihre Leistung und deren Regelung sind wesentliche Faktoren unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz.

Überdimensionierungen von Ventilatoren führen zu Effizienzverlusten im energetischen und ökonomischen Sinn. Zur Auslegung von Ventilatoren wird auf das Kapitel Industrielle Lufttechnik verwiesen.

Eine Planung im Sinne bester verfügbarer Technik soll folgende Kriterien beachten, um eine energieeffiziente Lösung der Lüftungsaufgabe zu erreichen:

- ▶ ausreichend große Querschnitte der Luftleitungen (ein 10 % größerer Durchmesser kann bis 72 % weniger Energie für die Luftförderung erfordern),
- ▶ bevorzugt Einsatz kreisförmiger Kanäle, diese haben bei gleicher Querschnittsfläche und Länge weniger Druckverlust als rechtwinklige Kanäle,
- ▶ Vermeiden von langen Strecken und Hindernissen (Biegungen, engere Abschnitte etc.),
- ▶ Dichtheit, besonders an Verbindungsstellen,
- ▶ Abgleich des Systems in Bezug auf verteilungsbedingte Druckverluste im Stadium der Planung/Auslegung mit Hilfe spezialisierter Berechnungssoftware, um sicherzustellen, dass alle 'Anwender' die erforderliche Belüftung erhalten und keine nachträglichen Drosselungen notwendig werden.

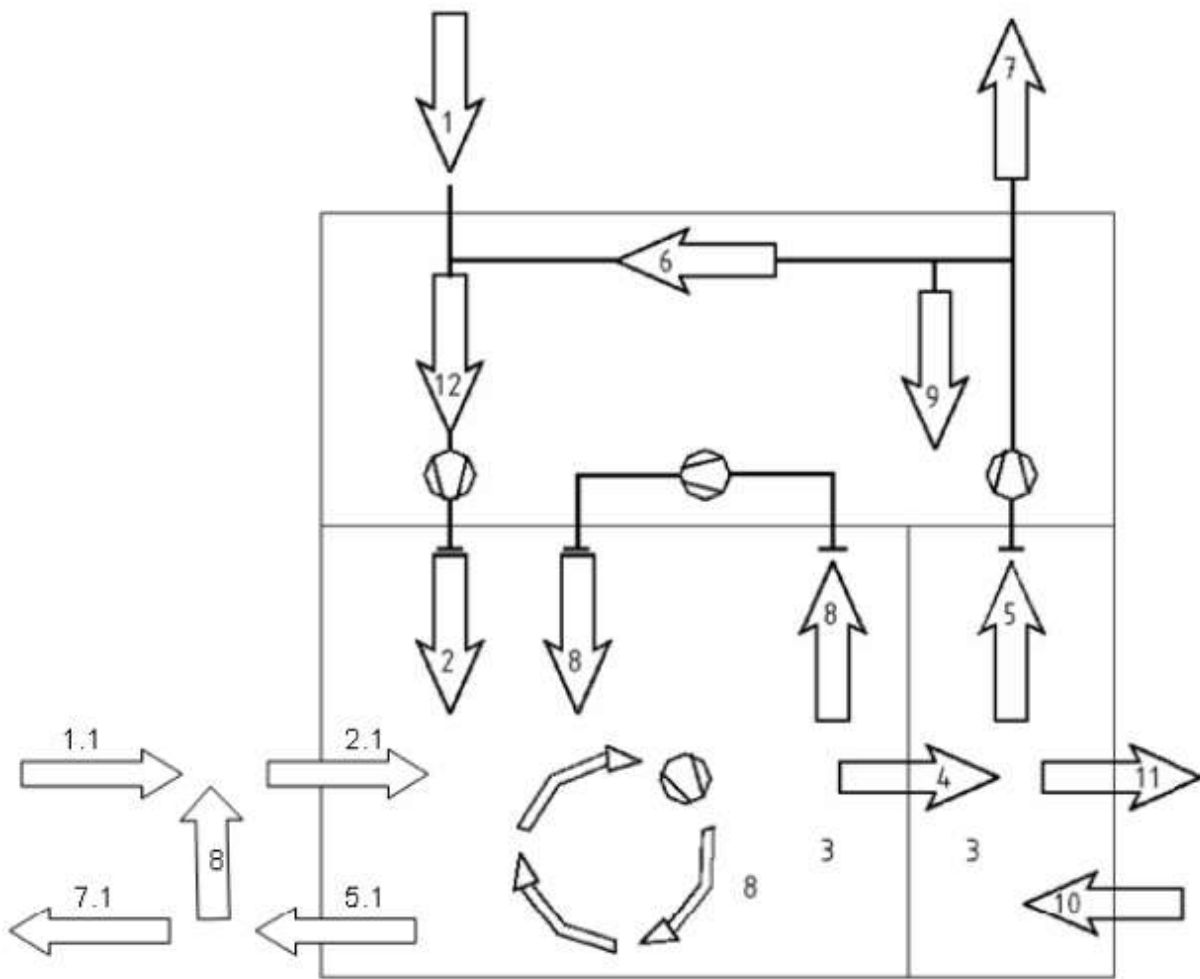
#### A.8.2.3.3 Luftaufbereitung

##### A.8.2.3.3.1 Übersicht

Luftaufbereitung ist dann nötig, wenn die vorgegebenen Qualitätskriterien eines Luftstromes ohne technische Maßnahmen nicht sicher eingehalten werden können.



Abbildung A.8-1: Darstellung der Luftarten



Quelle: (89)

Man unterscheidet, wie in Abbildung A.8-1 dargestellt, zwischen Außenluft [1], Zuluft [2], Raumluf [3], Überströmluft [4], Abluft [5], Umluft [6], Fortluft [7], Sekundärluft [8], Leckluft [9], Infiltration [10], Exfiltration [11] und Mischluft [12]. Für Räume, deren Luftversorgung mit Hilfe eines Einzelraum-Luftbehandlungsgeräts aufbereitet wird, gibt es weiterhin Außen- [1.1], Zu- [2.1], Ab- [5.1] und Fortluft [7.1]. Die Systemgrenze besteht hierbei in der Grenze zwischen dem Raum und dem Luftbehandlungsgerät (89).

Sowohl für Zu- als auch Fortluft ist darauf zu achten, dass die Luftqualität (Schadstoffbelastung) so eingestellt werden kann, dass Gefährdungen von Mensch und Umwelt vermieden und gesetzliche Rahmenbedingungen eingehalten werden.

Neben der Belastung mit Schadstoffen ist in vielen Anwendungsfällen auch die Feuchtigkeit der Luft so zu regulieren, dass die Bildung von Kondensat und daraus resultierende mikrobielle Belastungen im Gebäudeinneren sowie Gebäudeschäden verhindert werden.

#### A.8.2.3.3.2 Luftaufbereitung durch Filtration

Luftfilter werden verwendet, um Zu- oder Abluft von partikel- und/oder gasförmigen Schadstoffen zu entfrachten.

Aus Sicht der Energieeffizienz ist eine bedarfsgerechte Dimensionierung der Luftfilter besonders wichtig, da mit höheren Abscheidegraden durch feinere Filterung die Druckverluste und somit der Strombedarf des Luftleitsystems ansteigen. Weiterhin sind die durch die Schadstoffrückhaltung in den Luftfiltern tendenziell ansteigenden Druckverluste zu überwachen und durch geeignete Maßnahmen (regelmäßige Abreinigung oder Austausch) zu begrenzen.

In den Normen EN ISO 16890-1 bis 4 (91) wird ein System für die Klassifizierung der Effizienz von Luftfiltern formuliert.

#### **A.8.2.3.3 Luftaufbereitung durch Be- und Entfeuchtung**

Die Be- und Entfeuchtung von Luft ist auf Grund der großen spezifischen Verdampfungs- bzw. Kondensationsenthalpie von Wasser/Wasserdampf ein energieintensiver Teilprozess. Daher ist bei der Festlegung von zulässigen Grenzwerten der Raumluftfeuchte der tatsächliche Regelungsbedarf sorgfältig zu prüfen und ggf. anhand von Betriebserfahrungen (Monitoring) anzupassen.

Außerdem sind hygienische Vorschriften zu beachten (u. a. Gefahr von Legionellenbildung), insbesondere für die Beschaffenheit des Wasser zur Befeuchtung.

#### **A.8.2.4 Regelung**

Eine wichtige Voraussetzung für den energieeffizienten Betrieb von Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs- und Klimatisierungs-Anlagen besteht in der Auswahl des richtigen Regelungsverfahrens.

Die Regelung solcher Anlagen ist grundsätzlich dann effizient, wenn mit der Regelstrategie erreicht wird, dass die Anlagen bei minimalem Energieaufwand die dem Bedarf entsprechenden bzw. vorgeschriebenen Raumklimaparameter erreichen. Unnötige Betriebszeiten und Betriebszustände mit nicht erforderlichem Energieeintrag sind zu vermeiden.

Auf System-Ebene unterscheidet man zwischen raumbezogenen und zentralisierten Regelkonzepten. Raumbezogene Regelungen regeln die Temperatur bzw. Lüftung/Klimatisierung eines Raumes. Zentrale Systeme regeln die Funktion des ganzen Systems (mehrere Räume oder Gebäudezonen) (89).

Auf funktionaler Ebene sind in Anlehnung an die europäische Norm DIN EN 16798-3 (89) sechs Kategorien für die Regelung raumlufttechnischer Anlagen zu unterscheiden, nachfolgend aufgelistet nach ansteigendem Automatisierungsgrad.

- ▶ konstanter Betrieb,
- ▶ manuelle Regelung,
- ▶ Regelung nach vorgegebenem Zeitplan,
- ▶ belegungsabhängige Regelung mit Auslöser (z. B. Lichtschalter, Infrarotsensor),
- ▶ bedarfsabhängige Regelung (Abstufung z. B. nach Personenaufkommen),
- ▶ sensorisch erfasste automatische bedarfsabhängige Regelung (z. B. CO<sub>2</sub>-, Mischgas-, Luftfeuchtesensoren).

Je nach Aufgabenbereich und Anlage kann jede dieser Regelungsarten zu einem effizienten Anlagenbetrieb führen. Tendenziell ist mit zunehmendem Automatisierungsgrad eine größere Energieeffizienz erreichbar.

Auf der technischen Ebene erfolgt die konkrete Umsetzung der Regelung insbesondere durch die Änderung von Volumenströmen der Heiz- und Kühlmedien sowie von Luftströmen, bei Heizungssystemen ggf. auch Brennerleistungen. Detailliertere Informationen dazu sind in den speziellen Kapiteln zu elektromotorischen Antrieben, Pumpensystemen, Industrieller Lufttechnik und Feuerungsanlagen enthalten.

#### **A.8.2.5 Wartung, Instandhaltung, Monitoring**

Um einen langfristigen, effizienten Betrieb von Heiz-, Kühl- und Lüftungsanlagen zu gewährleisten, ist eine fachgerechte Instandhaltung unerlässlich. Dies entspricht sowohl betrieblichen ökonomischen Interessen als auch dem Energieeffizienzgebot. Die Norm DIN 31051 (92) strukturiert die Instandhaltung in vier Grundmaßnahmen.

- ▶ Wartung,
- ▶ Inspektion,
- ▶ Instandsetzung,
- ▶ Verbesserung.

Teilweise sind derartige Maßnahmen durch Hersteller von Anlagen bzw. Anlagenkomponenten bereits vorgeschrieben, teilweise sind dafür auch gesetzliche Vorschriften sowie Normen und Richtlinien anzuwenden.

Beispiele hierfür sind:

- ▶ die gemäß § 14 der EU-Gebäuderichtlinie EBPD 2010 vorgeschriebene regelmäßige Inspektion der zugänglichen Teile von Gebäudeheizungen ab einer Kesselnennleistung von 20 kW, für deren Durchführung die Norm DIN EN 15378-1 (93) angewendet werden kann,
- ▶ die gemäß § 12 der EnEV vorgeschriebene regelmäßige energetische Inspektion von Klimaanlage ab einer Nennkälteleistung von 12 kW, für deren Durchführung die Norm DIN SPEC 15240 (90) anwendbar ist.

Zusätzlich zur Instandhaltung und wesentliche Grundlage für die Erhaltung und eventuell sogar spätere weitere Verbesserung der Energieeffizienz ist es beste verfügbare Technik, wesentliche energierelevante Betriebsdaten kontinuierlich messtechnisch zu erfassen, in ausreichender Datendichte aufzuzeichnen und regelmäßig auszuwerten.

Es ist weiterhin beste verfügbare Technik, diese Maßnahmen zum Energiedatencontrolling und Monitoring, zur Wartung und Instandhaltung sowie zur regelmäßigen Schulung der dafür zuständigen Mitarbeiter in ein betriebliches Energiemanagementsystem zu integrieren.

## A.9 Beleuchtung

### A.9.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Beleuchtung

#### A.9.1.1 Anwendungsbereich der Beleuchtung und einsatzbestimmende Eigenschaften

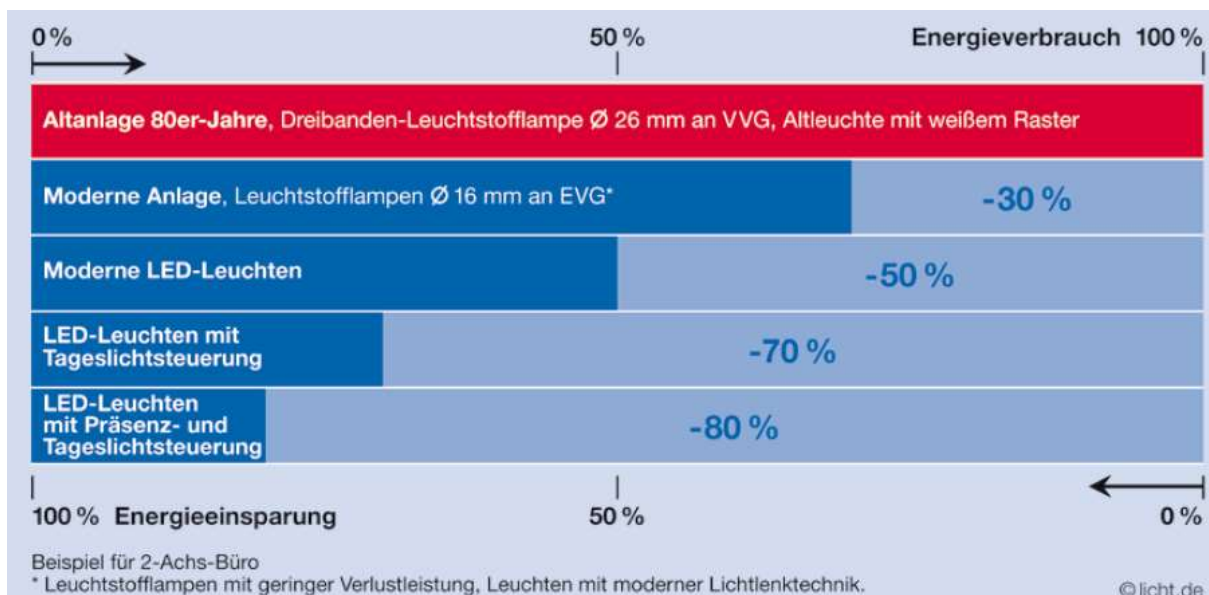
Künstliche Beleuchtungsanlagen finden in den verschiedensten Anwendungsbereichen wie Produktionshallen, Büroräumen, Lagerhallen oder im Außenbereich ihren Einsatz. Je nach Beleuchtungsaufgabe richtet sich die künstliche Beleuchtung nach arbeitsschutzrechtlichen, sicherheitstechnischen oder artenschutzfachlichen Anforderungen oder zielt auf die Steigerung des Wohlbefindens des Menschen. Eine Zusammenstellung wesentlicher normativer Anforderungen bietet das Kapitel Beleuchtung des Abschlussberichtes (54).

Ein auf Energieeffizienzaspekte hin optimiertes Beleuchtungskonzept und eine entsprechend umgesetzte Beleuchtungsanlage zeichnen sich durch folgende Kriterien aus:

- ▶ bestmögliche Nutzung von Tageslicht
- ▶ optimale Beschaffenheit der auszuleuchtenden Räume und Bereiche (Wandfarbe, Inneneinrichtung, Anordnung der Nutzungsbereiche)
- ▶ optimale Steuerung der Beleuchtung unter intelligenter Einbeziehung der Nutzungs- und Anwesenheitszeiten von Personen sowie des Angebots von Tageslicht
- ▶ Einsatz energieeffizienter Lampen und Leuchten
- ▶ angepasste Wartung von Leuchtmitteln, Leuchten und Räumen.

Die Höhe des Einsparpotentials ist dabei maßgeblich abhängig vom Ist-Zustand einer bestehenden Beleuchtungsanlage oder der Ausführung eines alternativen Konzeptes. Typische Energieeinsparungen am Beispiel unterschiedlicher Anlagenkonzepte für die Bürobeleuchtung sind in nachfolgender Abbildung A.9-1 dargestellt.

Abbildung A.9-1: Beispielhafte Energieeinsparpotenziale für Bürobeleuchtung



Quelle: <https://www.licht.de/de/grundlagen/licht-und-umwelt/energie-sparen/>, aufgerufen am 3.5.2019

#### A.9.1.2 Einführung: Grundbegriffe der Beleuchtung

Beleuchtungsanlagen bestehen aus Leuchtmittel und Leuchte:

- ▶ Leuchtmittel (Lampe): Wandelt elektrische Energie in sichtbare Strahlung

- ▶ Leuchte: Konstruktion, in die ein Leuchtmittel eingebaut ist (Halterung, Fassung, Reflektor, Schirm oder Glasabdeckung).

Folgende Begriffe der Beleuchtungstechnik sind für das Grundverständnis im Bereich der Beleuchtungstechnik elementar:

- ▶ Der Lichtstrom ( $\Phi$ ) in Lumen (lm) gibt an, wie viel Licht eine Lampe in alle Richtungen abgibt.
- ▶ Die Lichtausbeute ( $\eta_v$ ) in Lumen pro Watt (lm/W = Lichtstrom pro aufgenommener Leistung) ist ein Maß für die Effizienz der Lampe. Je höher dieser Wert, desto effizienter ist die Lampe. Wenn die aufgenommene Leistung auf den Verbrauch von Vorschaltgeräten u. ä. Komponenten beinhaltet, wird von der Lichtausbeute des Systems bzw. der Leuchte gesprochen.
- ▶ Die Lichtstärke ( $I_v$ ) ist ein Maß für die räumliche Verteilung des Lichtstroms und besitzt die Maßeinheit Candela (cd = lm/sr), welche sich aus dem Verhältnis des Lichtstroms angegeben in lm und dem Raumwinkel in sr (auch als Abstrahlwinkel bezeichnet) ermittelt.
- ▶ Die Beleuchtungsstärke ( $E_v$ ) in Lux (lx = lm/m<sup>2</sup>) beschreibt die Menge des Lichtstroms in lm, die auf eine Fläche (m<sup>2</sup>) auftrifft. Diese nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab. Das bedeutet, dass bei doppelter Entfernung zur Leuchte nur noch ein Viertel der Beleuchtungsstärke erreicht wird.
- ▶ Die Leuchtdichte ( $L_v$ ) in cd/m<sup>2</sup> ist definiert als das Verhältnis der Lichtstärke in cd und der auf die Ebene senkrecht zur Ausstrahlungsrichtung projizierten Fläche in m<sup>2</sup>. Das Licht kann aber auch von der Fläche reflektiert oder transmittiert werden. Für gestreut reflektierende (matte) und für gestreut transmittierende (trübe) Materialien wird die Leuchtdichte aus der Beleuchtungsstärke und dem Reflexions- bzw. Transmissionsgrad berechnet. Die Leuchtdichte ist das Maß des erforderlichen Beleuchtungsniveaus für die Außen- und Straßenbeleuchtung.

Die Energieeffizienz einer Beleuchtungsanlage wird von diesen genannten lichttechnischen Grundgrößen bestimmt. Die Qualität der Beleuchtung kann zusätzlich durch folgende Güteigenschaften beschrieben werden:

- ▶ Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke (harmonische Helligkeitsverteilung),
- ▶ Begrenzung der Blendung,
- ▶ Lichtrichtung und Schatten,
- ▶ Lichtfarbe (Farbtemperatur) in Verbindung mit der
- ▶ Farbwiedergabe der Leuchtmittel (Lampe).

### **A.9.1.3 Qualitative und quantitative Relevanz der Beleuchtung im Kontext des zu prüfenden Antragsgegenstandes**

#### **A.9.1.3.1 Systembetrachtung**

Beleuchtungssysteme müssen Helligkeitsanforderungen und andere lichttechnische Qualitätsanforderungen erfüllen, die sich aus der konkreten Arbeitsaufgabe ergeben. Die wesentlichsten Vorgaben für einzuhaltende Beleuchtungsstärken und andere Qualitätsmerkmale in Abhängigkeit der jeweiligen Arbeitsaufgabe sind in der DIN EN 12464 Teil 1 und Teil 2 sowie der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) A3.4 enthalten.

Hieraus abgeleitet definieren sich die konkreten Anforderungen an Leuchten und Lampen sowie deren Verteilung im Raum, die Nutzung von Steuerungsmöglichkeiten (Lichtmanagement) und die Ausgestaltung der Räume/Bereiche sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht.

#### **A.9.1.3.2 Bagatellschwellenprüfung**

Ist die geplante Systemleistung (installierte elektrische Leistung der Beleuchtungsanlagen): < 10 kW = Ende der Prüfung (Bagatellschwelle)

Wenn  $P_{\text{System, Beleuchtung}} > 10 \text{ kW}$ : Weiter mit Kapitel A.9.2.

Für wesentliche Änderungen vorhandener Anlagen beziehen sich die Bagatellschwellen auf die Erhöhung des Endenergieaufwandes bzw. die Erhöhung der installierten Leistung.

## **A.9.2 Angaben zu Beleuchtungssystemen im Rahmen eines Antragsverfahrens (bei Überschreitung der Bagatellschwellen)**

### **A.9.2.1 Lichtkonzept und Beleuchtungsplanung**

Zum Zeitpunkt der Erstellung von Genehmigungsantragsunterlagen verfügt der Vorhabensträger in der Regel noch nicht über Detaildaten geplanter Beleuchtungsanlagen. Von den Vorhabenträgern werden Detailplanungen und Bestellvorgänge, in deren Rahmen solche Daten rechnerisch ermittelt oder von Lieferanten verbindlich angegeben werden, erst nach Erhalt von Genehmigungen begonnen. Es entspricht bester verfügbarer Technik, dass entsprechende Angaben durch Fachplaner im Rahmen einer qualifizierten Ausführungsplanung erarbeitet werden.

Für die Sicherstellung der Realisierung energieeffizienter und gleichzeitig richtlinienkonformer Beleuchtungssysteme ist es ausreichend und angemessen, die Erstellung einer entsprechenden Beleuchtungsplanung zu beauftragen und die entsprechende Dokumentation zur Inbetriebnahme der Anlage vorzuhalten. Da ein der Realisierung vorgeschalteter qualifizierter Planungsprozess auch im Interesse des Vorhabensträgers ist, kann dies ohne signifikanten Mehraufwand erfüllt werden.

Eine beleuchtungstechnische Fachplanung umfasst in der Regel ein Lichtkonzept und eine abgeleitete Beleuchtungsplanung:

#### ► Lichtkonzept:

- Nutzungsart/wesentliche Tätigkeit,
- Abgrenzung der zu beleuchtenden Räume/ Arbeitsbereiche ( $\text{m}^2$ ),
- Anforderungen an die Beleuchtungsstärke ( $\text{lx}/\text{m}^2$ ) bzw. Leuchtdichte ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) bei Außenbeleuchtung und besonderen Arbeitsaufgaben sowie andere Qualitätsparameter (z. B. Farbwiedergabe).

#### ► Beleuchtungsplanung:

- Angaben zur Raumgeometrie/den Arbeitsbereichen (Raumindex), zur Fensteranordnung und zum Reflexionsgrad der Raumbegrenzungsflächen (Farbe),
- Auswahl, Anordnung und Anzahl der Leuchten,
- Angaben zu Lichtmanagement,
- Angaben zu den Leuchtmitteln und Leuchten mit Energie-Effizienz-Index (EEI),
- installierte Systemleistung ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) und Energieverbrauch für die geplante Nutzung ( $\text{kWh pro m}^2/\text{a}$ ) in Abhängigkeit der jeweiligen Beleuchtungsaufgabe,
- Wartungsplan mit Vorgaben für den Lampenwechsel und Reinigungsintervalle der Leuchten (und Räume).

Bei der Planung neuer Beleuchtungsanlagen sind Anforderungen und Gegebenheiten des vorhandenen oder zu planenden Raumes festzustellen. Es handelt sich insbesondere um (94):

- Art der Raumnutzung und der Sehaufgabe,
- Bereich oder Bereiche der Sehaufgabe,
- Abmessungen,
- Reflexionsgrade der Raumbegrenzungsflächen,
- Hauptlichtrichtung,



► Umgebungsbedingungen wie Temperaturen und Verschmutzung (z. B. Staubbelastung).

Die Beleuchtungsplanung sollte auf der Basis einer verbindlichen Einrichtungsplanung erfolgen. Dabei sollten mögliche Maßnahmen zur verbesserten Nutzung des Tageslichts wie z. B. die Änderungen in der Gebäudenutzung oder der Dachkonstruktion berücksichtigt werden.

Dabei muss die Planung europäischen und nationalen Normen und Richtlinien entsprechen. Eine Zusammenstellung dieser normativen Anforderung ist (54) zu entnehmen. Auf Grundlage dieser Anforderungen erfolgt die Beleuchtungsplanung in sechs Schritten (95).

1. Definition eines Lichtkonzepts und Wahl der Beleuchtungsarten,
2. Definition der notwendigen lichttechnischen Güte,
3. Definition des Lichtmanagements,
4. Definition der Komponenten (Art, Anzahl und Anordnung von Leuchten sowie Betriebsgeräte) nach Wirkungsgradverfahren,
5. Definition des Wartungsplanes,
6. Berechnung und Visualisierung.

Für die Berechnung werden von Fachplanern regelmäßig leistungsfähige Berechnungswerkzeuge in Form fachspezifischer Software verwendet. Diese Softwareprodukte ermöglichen auch eine zwei- oder dreidimensionale Darstellung der geplanten Raumausleuchtung und zum Teil die Berechnung des Jahresenergiebedarfs unter Berücksichtigung standortkonkreter Außenlichtbedingungen und der geplanten Lichtsteuerungssysteme.

Als Grundlage zur Bewertung von Planungsalternativen oder Optimierungsmaßnahmen sollte eine Analyse der Lebenszykluskosten herangezogen werden. Im Gegensatz zu einer reinen Bewertung der Investitionskosten berücksichtigen die Lebenszykluskosten alle während der Lebenszeit einer Beleuchtungsanlage anfallenden Kosten wie Energie-, Wartungs-, Reinigungs- und Entsorgungskosten. Der Ansatz erlaubt daher eine aussagekräftige Bewertung der Wirtschaftlichkeit über den geplanten Lebenszyklus der Beleuchtungsanlage (96).

Das Beleuchtungsniveau einer Beleuchtungsanlage nimmt während der Lebensdauer infolge von Ausfall, Alterung und Verschmutzung der Lampen und Leuchten sowie Alterung und Verschmutzung der Raumboflächen ab. Um ein angestrebtes Beleuchtungsniveau („Wartungswert der Beleuchtungsstärke“) über einen definierten Zeitraum sicher nicht zu unterschreiten, muss diese Lichtstromabnahme bei der Planung einer Beleuchtungsanlage durch Berücksichtigung eines angemessenen Wartungsfaktors einbezogen werden. Dieser dient der Bestimmung des Neuwertes des Beleuchtungsniveaus. Die Beleuchtungsplanung muss demnach Vorgaben für den Lampenwechsel und Reinigungsintervalle der Leuchten und Räume enthalten, um eine übermäßige und energetisch nicht effiziente Überdimensionierung zu vermeiden.

Für die Sicherstellung der Realisierung energieeffizienter und gleichzeitig richtlinienkonformer Beleuchtungssysteme ist es ausreichend und angemessen, die Erstellung o. g. Planungen zu beauftragen und die entsprechende Dokumentation zur Inbetriebnahme der Anlage vorzuhalten. Da ein der Realisierung vorgeschalteter qualifizierter Planungsprozess auch im Interesse des Vorhabensträgers ist, kann dies ohne signifikanten Mehraufwand erfüllt werden.

#### **A.9.2.2 Leuchtmittel**

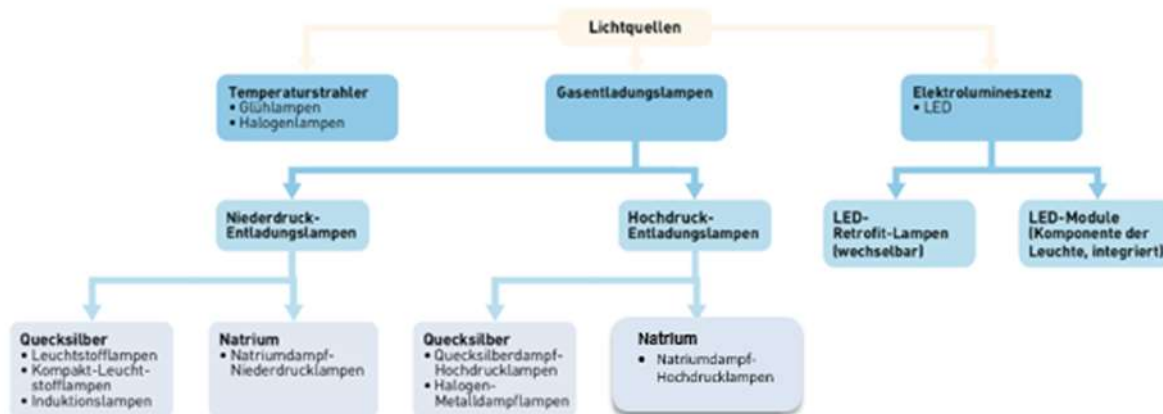
Die Umwandlung der elektrischen Energie in sichtbare Strahlung erfolgt in Leuchtmitteln (Lichtquellen). Prinzipiell werden drei Arten solcher Energieumwandlung unterschieden, nämlich die Lichterzeugung durch:

- Temperaturerhöhung (Temperaturstrahler),
- Gasentladung (Entladungslampen) und
- elektronische Vorgänge in Festkörpern, Elektrolumineszenz (LED).



Marktübliche Temperaturstrahler und Entladungslampen sind stets mit Sockeln für den austauschbaren Betrieb in Leuchten ausgerüstet. Für LED-Leuchtmittel gilt dies überwiegend nicht mehr. In vielen Anwendungen werden heute bevorzugt Leuchten mit fest integrierten LED-Leuchtmitteln eingesetzt. Damit beschränken sich die Betriebskosten im Falle eines Defektes nicht auf den einfachen Austausch des Leuchtmittels, sondern schließen die Installation einer neuen Leuchte ein (97). In nachfolgender Abbildung A.9-2 sind praxisübliche Leuchtmittel mit der Art ihrer Energieumwandlung dargestellt:

Abbildung A.9-2: Übersicht gebräuchlicher Leuchtmittel



Quelle: (97)

Eine detaillierte Beschreibung der wichtigsten Leuchtmittel mit deren wesentlichen Eigenschaften ist dem Kapitel Beleuchtung in (54) zu entnehmen.

Im Hinblick auf die Energieeffizienz marktverfügbarer Leuchtmittel ist deren Lichtausbeute das wesentlichste Vergleichskriterium. Übliche Wertebereiche der Lichtausbeuten marktverfügbarer Leuchtmittel (ohne Berücksichtigung der Verluste durch zum Teil erforderliche Vorschaltgeräte) sind in nachfolgender Abbildung A.9-3 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass LED die größten Potenziale für effiziente Beleuchtungslösungen bieten.

Abbildung A.9-3: Lichtausbeuten verschiedener Leuchtmittel



Quelle: <https://www.licht.de/de/grundlagen/beleuchtungstechnik/traditionelle-lichtquellen/lichtausbeute/>, aufgerufen am 3.5.2019

Für den Einsatz effizienter Leuchtmittel existieren umfangreiche EU-Vorgaben (Ökodesign-Richtlinien), welche von den Herstellern umzusetzen sind. Leuchtmittel, welche bestimmte Anforderungen an:

- ▶ Farbwiedergabe,
- ▶ Lichtausbeute,
- ▶ Lampenlichtstromwartungsfaktor,
- ▶ Lampenüberlebensfaktor

nicht mehr erfüllen, dürfen nicht mehr in den Verkehr gebracht werden.

Kenngröße für die Energieeffizienz der Lampen unter Berücksichtigung der Betriebseigenschaften ist der Energie-Effizienz-Index (EEI) für ungebündeltes sowie gebündeltes Licht. Vereinfacht ergibt sich der Energie-Effizienz-Index aus dem Verhältnis der Systemleistung (Lampenleistung + Verlustleistung des Vorschaltgerätes) geteilt durch die Referenzsystemleistung, die sich über eine Berechnungsformel aus dem Nutzlichtstrom des Lampenmodells ergibt. Eine Übersicht der daraus abgeleiteten Effizienzklassen zeigt die nachfolgende Abbildung A.9-4.

Abbildung A.9-4: Energieeffizienzklassen für Lampen entsprechend der EU-Verordnung Nr. 874/2012

| Energieeffizienzklasse  | Energieeffizienzindex (EEI) für Lampen mit ungebündeltem Licht | Energieeffizienzindex (EEI) für Lampen mit gebündeltem Licht |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| A++ (höchste Effizienz) | $EEI \leq 0,11$                                                | $EEI \leq 0,13$                                              |
| A+                      | $0,11 < EEI \leq 0,17$                                         | $0,13 < EEI \leq 0,18$                                       |
| A                       | $0,17 < EEI \leq 0,24$                                         | $0,18 < EEI \leq 0,40$                                       |
| B                       | $0,24 < EEI \leq 0,60$                                         | $0,40 < EEI \leq 0,95$                                       |
| C                       | $0,60 < EEI \leq 0,80$                                         | $0,95 < EEI \leq 1,20$                                       |
| D                       | $0,80 < EEI \leq 0,95$                                         | $1,20 < EEI \leq 1,75$                                       |
| E (geringste Effizienz) | $EEI > 0,95$                                                   | $EEI > 1,75$                                                 |

Quelle: (98)

Als „Lampe mit gebündeltem Licht“ gilt eine Lampe dann, wenn sie mindestens 80 v.H. ihres Lichtstromes in einem bestimmten Winkel ausstrahlt. Dies ist der Raumwinkel mit der Größe  $\pi$  sr, was einem Kegel mit einem Winkel von  $120^\circ$  gleichkommt.

### A.9.2.3 Lichtmanagement

„Lichtmanagement“ soll dafür sorgen, dass das richtige Licht zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge zur Verfügung steht und Tageslicht optimal ausgenutzt werden kann. Gleichzeitig bietet es die Möglichkeit, künstliches Licht bedarfsgerecht und damit energieeffizient einzusetzen. Folgende grundsätzliche Steuerungs- und Regelmöglichkeiten bestehen mit Hilfe elektronischer Betriebsgeräte (u. a. Sensoren, Controllern, Vorschaltgeräte):

- ▶ Regelung nach Tageslicht: Messung Tageslichtanteil und automatische Reduzierung des Kunstlichtanteils („Konstantlichtregelung“)
- ▶ Regelung nach Anwesenheit: Bei Anwesenheit wird Kunstlicht eingeschaltet und
  - bei Abwesenheit abgeschaltet (Präsenzmelder)
  - nach einer definierten Zeit automatisch abgeschaltet (Bewegungsmelder)

- ▶ Nutzungsabhängige Regelung: Die Beleuchtung wird auf definierte Nutzungszeiten begrenzt
- ▶ Human Centric Lighting:
  - Kunstlicht orientiert sich am natürlichen Licht und dessen Änderung im Tagesverlauf zur Steigerung des Wohlbefindens des Menschen
  - es erfolgt eine Anpassung der Beleuchtungsstärke und der Lichtfarbe, um die biologische Wirkung des natürlichen Lichts auf den Menschen nachzubilden

## **A.10 Trocknungsprozesse**

### **A.10.1 Einführung und Abgrenzung des Prüfgegenstandes beim Themenbereich Trocknungs-, Trennungs- und Konzentrationsprozesse**

#### **A.10.1.1 Definition von Trocknungs-, Trennungs- und Konzentrationsprozessen und Abgrenzung zu anderen BVT-Merkblättern**

Trocknungs-, Trennungs- und Konzentrationsprozesse sind typische verfahrenstechnische Schritte, die nahezu in jedem Produktionsverfahren auftreten.

Unter Trocknung versteht man dabei das Entfernen oder Vermindern der Feuchte eines Gutes durch Zu- oder Abführen von Wärme, wobei die Feuchte eine Änderung ihres Aggregatzustandes erfährt.

Ziel eines Trennprozesses ist allgemein das Zerlegen eines Stoffgemisches in mindestens zwei Produkte, deren Bestandteile sich hinsichtlich der für die Trennung herangezogenen Eigenschaft unterscheiden. Typische Trennprozesse sind

- ▶ die mechanische Abtrennung von Feststoffen unterschiedlicher Korngröße (z. B. Sieben oder Klassieren),
- ▶ die Abscheidung von festen Stoffpartikeln aus Gasphasen (z. B. Staubfilter) oder aus wässrigen Phasen (z. B. Sedimentation, Filtration, Pressen, Zentrifugieren),
- ▶ die Trennung von Flüssigkeiten unterschiedlicher Eigenschaften (z. B. Destillation, Osmose),
- ▶ die Trennung von Gasphasen unterschiedlicher Eigenschaften (z. B. Adsorption, Absorption).

Trennprozesse können also sowohl mechanisch als auch thermisch unter Zufuhr von Wärme durchgeführt werden. Insbesondere thermische Trennprozesse sind häufig noch mit Änderungen der Stoffkonzentrationen verbunden.

Trennprozesse sind unmittelbarer Bestandteil von Produktionstechnologien und werden im Wesentlichen durch verfahrenstechnische Auslegungen und Berechnungen bestimmt. Daher werden sie in der vorliegenden Vollzugshilfe „Energieeffizienz“ nicht weiter betrachtet.

Gleiches trifft wegen der Bedeutung für die Produktqualität auf Trocknungsvorgänge zu, welche in BREFs oft im Zusammenhang mit den Produktionstechnologien beschrieben werden, in denen sie angeordnet sind. Entsprechende technologiebezogene Angaben zur Energieeffizienz finden sich daher dort und werden an dieser Stelle nicht betrachtet.

Grundsätzlich können Trocknungs- und Trennungungsverfahren jedoch einen erheblichen Anteil des Energiebedarfs von Produktionsprozessen verursachen und müssen deshalb aufmerksam betrachtet werden, wenn es um das Identifizieren von Energieeinsparpotenzialen geht.

Die Trocknung kann durch mechanische, thermische oder chemische Verfahren erfolgen. Auf Grund der physikalischen Zusammenhänge ist die Abtrennung einer Flüssigkeit von einem Gemisch aus flüssigen und festen Bestandteilen umso energieintensiver, je niedriger der angestrebte Restflüssigkeitsgehalt der festen Phase ist. Mit mechanischen Trennverfahren (unter Nutzung von Trägheitskräften und Dichteunterschieden) verbleiben meist noch relativ hohe Restflüssigkeitsgehalte in der festen Phase. Niedrige Restflüssigkeitsgehalte können nur durch thermische Verfahren, also das Verdampfen, erreicht werden. Diese sind energetisch aufwändiger. Deshalb ist es sinnvoll, die Verfahren zu kombinieren. Es werden häufig weniger energieintensive mechanische Verfahren wie Sedimentation, Filtration, Pressen oder Zentrifugieren den thermischen Verfahren vorgeschaltet.

#### **A.10.1.2 Typische Trocknungsprozesse und Trocknerbautypen**

Die Auswahl des geeigneten Trocknungsprozesses richtet sich im Wesentlichen nach den vorliegenden Stoffeigenschaften und dem zu erreichenden Trocknungsziel.

Die Einteilung von Trocknertypen erfolgt daher nach den unterschiedlichen Trocknungsbedingungen:

- ▶ Art der Wärmezufuhr (z. B. Konvektions- oder Strahlungstrockner),
- ▶ Betriebsdruck (Normaldruck- oder Vakuumtrockner),
- ▶ Aggregatzustand (Gefrier-, Flüssigkeits- oder Feststofftrockner),
- ▶ Strömungsführung (Gleich-, Gegen- oder Kreuzstromtrockner),
- ▶ Trocknungsdauer (Kurzzeit-, Mittelzeit- oder Langzeittrockner),
- ▶ Betriebsweise (Chargen- oder Durchlauftrockner),
- ▶ äußerer Form des Guts (z. B. Stückgut- oder Pastentrockner),
- ▶ Formgebung bei der Trocknung (z. B. Granulier- oder Mahltrockner).

Nachfolgend werden aus der großen Fülle möglicher Konstruktionsformen und Betriebsweisen einige besonders häufig eingesetzte Trocknertypen exemplarisch näher vorgestellt.

#### Konvektionstrockner

Das Trocknungsgut wird mit einem heißen Gas (Luft, Verbrennungsgase oder Dampf) über- oder durchströmt. Das Gas ist aufnahmefähig für die abzutrennende Substanz (meistens Wasser) in ihrem gasförmigen Zustand. Die Temperaturerhöhung des Gutes geschieht durch Heranführung immer neuen warmen oder heißen Gases (Konvektion) an die Oberflächen des Trocknungsproduktes und Übergang der Wärme zum Ort der Verdampfung durch Wärmeleitung. Dadurch handelt es sich bezüglich des Gases um eine **direkte Trocknung**. Die Konvektionstrocknung kann, setzt man Hauptförderrichtung des Trocknungsproduktes und der Gasströmung in Relation zueinander, im Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom erfolgen.

Konvektionstrocknung im Gleichstrom wird eingesetzt:

- ▶ bei Empfindlichkeit des trockenen Gutes gegenüber hohen Temperaturen,
- ▶ bei Empfindlichkeit des angetrockneten Gutes gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit,
- ▶ wenn eine gleichmäßige Gutsfeuchte erzielt werden soll.

Konvektionstrocknung im Gegenstrom wird eingesetzt:

- ▶ zum Erreichen besonders niedriger Flüssigkeitsgehalte,
- ▶ bei hygroskopischen Trocknungsgütern,
- ▶ bei Empfindlichkeit des feuchten Gutes gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit,
- ▶ bei Trocknungsgütern, die unempfindlich gegenüber hohen Endtemperaturen sind.

Konvektionstrocknung im Kreuzstrom wird eingesetzt:

- ▶ wenn das Trocknungsgut sowohl im feuchten als auch im trockenen Zustand unempfindlich gegenüber hoher Trocknungsgeschwindigkeit ist,
- ▶ bei Unempfindlichkeit des Gutes im trockenen Zustand gegenüber Wärme,
- ▶ bei hohen erforderlichen Trocknungsgeschwindigkeiten.

Typische Konvektionstrockner sind:

- ▶ Kammertrockner für stückige, körnige, pastöse oder flüssige Güter in kleinen Mengen,
- ▶ Tellerrockner für kontinuierlich anfallende, rieselfähige Güter,
- ▶ Bandrockner für stückige, teigige und körnige Güter,
- ▶ Trommelrockner für kontinuierlich anfallende, große Mengen rieselfähiger Güter,
- ▶ Wirbelschichtrockner für körnige, nicht klebende Güter (kontinuierlich oder diskontinuierlich),
- ▶ Sprühtrockner für schnell trocknende sowie hitzeempfindliche flüssige bis pastöse Güter.

#### Kontaktrockner

Bei der Kontakttrocknung wird das Trocknungsgut durch Wärmeleitung bei direktem Kontakt mit einer beheizten Oberfläche erwärmt. Erfolgt die Beheizung der Kontaktflächen rückseitig durch ein heißes Gas, handelt es sich bezüglich dieses Gases durch die Anordnung einer trennenden Wand um **indirekte Trocknung**. Zur Beschleunigung der Verdampfung mittels Absenkung der Verdampfungstemperatur geschieht dies häufig unter Unterdruckbedingungen („Vakuum“), wobei durch Druckpulsation der Trocknungsprozess noch beschleunigt werden kann. Auch hier erfolgt der Abtransport der abzutrennenden Substanz (meistens Wasser) im gasförmigen Zustand, angetrieben durch die Unterdruckförderung („Vakuumpumpe“).

Typische Kontakt Trockner sind:

- ▶ Kammertrockner und Tellerrockner mit Beheizung der Horden und Teller, meist im Vakuum,
- ▶ Walzentrockner für dickflüssige, hitzeunempfindliche Güter,
- ▶ Schaufeltrockner für dickflüssige und pastöse Trocknungsgüter (z. B. Filterkuchen, Dickschlamm),
- ▶ Trommeltrockner für kontinuierlich anfallende, große Mengen rieselfähiger Güter,
- ▶ Doppelkonustrockner für rieselfähige Trocknungsgüter.

### Gefriertrockner

Die beiden Haupttypen der Konvektionstrockner und Kontaktrockner können noch modifiziert werden durch die Anwendung als Gefriertrockner. Dem Trocknungsvorgang wird dabei eine deutliche Temperaturabsenkung des Trocknungsproduktes vorgeschaltet, um die Wärmezufuhr bei geeignet niedrigen Tieftemperaturen und bei geeignetem Unterdruck stattfinden zu lassen. Es findet dann Sublimation statt.

Die Gefriertrocknung wird hauptsächlich für temperaturempfindliche, hochwertige Trocknungsgüter (z. B. Pharmazeutika, Nahrungsmittel) eingesetzt. Zum Einsatz kommen bspw. Kammertrockner (diskontinuierlich) und Tellerrockner (kontinuierlich), die mit Vakuumpumpe, Dampfkondensator und Kälteaggregat ausgerüstet sind. Dabei wird der physikalische Effekt der Sublimation, also des direkten Übergangs von festem in gasförmigem Zustand ausgenutzt.

### Energieeffizienz bei der Trocknung mit heißem Abgas

Die Verwendung der Energie von Abgasen aus thermischen Prozessen für die Trocknung bildet ein sehr großes Potenzial zur Erhöhung der Energieeffizienz.

Abgase aus thermischen Prozessen stehen als mehr oder weniger mit schädlichen Bestandteilen belastete Gasgemische mit Temperaturen zwischen 200 °C und über 800 °C zur Verfügung. Deren Verwendung für die Trocknung von Gütern erfordert, den Energietransport als Wärmestrom zum Ort der Verdampfung hin zu gestalten. Je nach Anforderung kann dies mittels einer Trennwand (Rohrwand, Platte o. ä.) (indirekte Trocknung) oder durch unmittelbare Beaufschlagung des Trocknungsproduktes durch das energiereiche Gas (direkte Trocknung) erfolgen.

Indirekte Trocknung vermeidet jeden - auch partiellen - Stoffübergang, zwischen Trocknungsprodukt und energiereichem Gas. Das Verfahren kann sehr effizient gestaltet werden. Verdampfte Flüssigkeit muss als separater Gasstrom vom Trocknungsprodukt abgezogen werden. Das verwendete energiereiche Abgas wird nicht mit verdampfender Flüssigkeit beaufschlagt. Außerdem kommen - evtl. schädliche - Bestandteile des energiereichen Gases nicht in Kontakt mit dem Trocknungsprodukt und können von diesem nicht aufgenommen werden.

Die stoffliche Trennung bei indirekter Trocknung erfordert jedoch den Einsatz von Wärmeübertragern und damit einen höheren Investitionsaufwand. Sie ist durch das notwendige Temperaturgefälle durch die Trennwand zudem mit gewissen Effizienzeinbußen verbunden. Die Temperatur des Abgases kann bei indirekter Trocknung nicht bis auf die Verdampfungstemperatur im Trocknungsgut abgesenkt werden, so dass ein entsprechend Teil des Wärmehaltes des Abgases nicht für den Trocknungszweck nutzbar ist.



Direkte Trocknung ist somit preiswerter und energieeffizienter als indirekte Trocknung, kann aber mit Auswirkungen auf Produktqualität und Emissionen verbunden sein kann. Daher ist bei direkter Trocknung große Aufmerksamkeit bezüglich des Stoffüberganges erforderlich in Bezug auf

- ▶ die Berücksichtigung von Wirkungen auf die Umwelt (z. B. Geruchsemissionen), die durch den Stoffübergang vom Trocknungsprodukt zum energieliefernden Gas, der mit dem eigentlichen Trocknungsvorgang einhergeht, entstehen;
- ▶ Qualitätsminderung des Produktes, die aus den schädlichen Bestandteilen des Abgases, z. B. Staub, resultieren.

#### A.10.2 Berechnung des Energiebedarfs und der Energieeffizienz von Trocknungsprozessen

Die theoretisch minimal benötigte Energie zur thermischen Trocknung hängt überwiegend ab von der zu verdampfenden Flüssigkeitsmasse und deren spezifischer (also massebezogener) Verdampfungsenthalpie.

Formel A.10-1

$$Q_{th} = \Delta m_s \Delta H_{v,s}$$

$Q_{th}$  theoretisch minimal notwendige Energie zur Trocknung, [kJ]

$\Delta H_{v,s}$  spezifische Verdampfungsenthalpie der abzutrennenden Substanz (z. B. S...Wasser) [kJ/kg]

$\Delta m_s$  Masse verdampfter Flüssigkeit, [kg]

Bei Wasser hat die spezifische (massebezogene) Verdampfungsenthalpie am Siedepunkt bei Normaldruck (100 °C) den Wert  $\Delta H_v = 2256 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Durch Einheitenumrechnung ergibt sich daraus der minimale spezifische Energiebedarf  $q_{th} = \frac{Q_{th}}{\Delta m_s} = 0,63 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ .

Der theoretische Mindestwert für die Verdampfungsenergie ist ein Orientierungswert.

Der tatsächliche Wärmebedarf eines industriellen thermischen Trockners liegt in der Regel höher als der theoretische Mindestwert. Grund für den Mehrbedarf sind Abstrahlungs- und Konvektionsverluste, Abgasverluste, Abluftverluste, zusätzliche Bindungsenthalpie der Feuchte im niedrigen Feuchtegehaltsbereich sowie der Wärmebedarf für die Anwärmung des Gutes mitsamt der enthaltenen Flüssigkeit und der Luft auf das Verdampfungstemperaturniveau.

Als meist nicht nutzbare Energieverluste kommen die Energieabgabe des Trockners über das Gehäuse durch Konvektion und Strahlung an die Umgebungsluft und die umgebenden Flächen hinzu sowie der Energieverlust durch Leckagen, die nicht im Hauptgasstrom erfasst sind.

Formel A.10-2

$$Q_{Trockner} = Q_{th} + Q_{pd} + Q_{Leer}$$

$Q_{Trockner}$  tatsächlicher Energiebedarf des Trockners, [kJ]

$Q_{pd}$  Energiebedarf zum Erwärmen des Trocknungsgases (thermische Verluste des Abgases), [kJ]

$Q_{Leer}$  Energiebedarf für entleerten Trockner (entspricht Abstrahlungs- und Konvektionsverlusten, [kJ])

Der tatsächliche Wärmebedarf kann aber auch deutlich reduziert werden, indem mittels Technologien der Wärmerückgewinnung dem Abgasstrom wiederum ein Teil der Energie entzogen wird. Dabei kann



auch ein Teil der Verdampfungsenthalpie genutzt werden, wenn der im Abgas enthaltene Dampf kondensiert. Diese Wärmeenergiemengen können entweder dem Trocknungsprozess selbst oder anderen Energieverbrauchern zugeführt werden.

Eine weitere Effizienzkennziffer von Trocknungsprozessen stellt der Nutzungsgrad dar. Dabei wird die zur Trocknung des Gutes minimal benötigte Energie der tatsächlich benötigten gegenübergestellt. Mit dieser Methode ist es möglich, Aussagen über die Effizienz des gesamten Trocknungsprozesses inklusive An- und Abfahrvorgängen bzw. Veränderungen der Betriebsparameter zu treffen. Der Nutzungsgrad kann folgendermaßen berechnet werden:

Formel A.10-3

---

$$\mu = \frac{Q_{th}}{Q_{Trockner}} \cdot 100\%$$

### **A.10.3 Stand der Technik bezüglich des Energiebedarfs von Trocknungsprozessen**

Die spezifischen Energiebedarfe der unterschiedlichen Trocknertypen liegen für die Verdampfung von Wasser im Bereich von 0,8 kWh/kg bis 5,9 kWh/kg.

Die beste verfügbare Technik ist geeignet dafür zu sorgen, dass der Energiebedarf des Trocknungsprozesses im Bereich der theoretisch minimal notwendigen Energiemenge zur Verdampfung der flüssigen Phase liegt. Diese beträgt beispielsweise für die Verdampfung von Wasser bei Normaldruck am Siedepunkt 0,63 kWh/kg.

Bei Vorliegen geeigneter Randbedingungen kann der spezifische Endenergiebedarf für die Trocknung sogar unterhalb der theoretisch minimal notwendigen Energiemenge liegen. Dies ist mit folgenden Prozessgestaltungen erreichbar, welche allerdings stets zusätzlichen apparatetechnischen Aufwand erfordern:

- ▶ Es ist möglich, mit der besten verfügbaren Technik Abwärme aus anderen Prozessen so zu nutzen, dass nur minimal thermische Energie von extern zugeführt werden muss und nur mechanische bzw. elektrische Energie in ebenfalls deutlich geringerem Umfang benötigt wird. Dies gilt analog auch bei lokaler Verfügbarkeit von geeigneten regenerativen, CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Wärmequellen (z. B. solarthermische Energie).
- ▶ Es ist möglich, mit der besten verfügbaren Technik Abwärme des Trocknungsprozesses intern so zu nutzen, dass nur ein geringer Teil der theoretisch erforderlichen thermischen Energie von extern zugeführt werden muss. Das beinhaltet auch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie.

Die Nutzung dieser besten verfügbaren Techniken setzt voraus, dass im Prozess hinreichend große Reserven bezüglich Zeit - unter Beachtung der Dynamik der auf Produktqualität abgestimmten Prozesse - und Raum - Aufstellfläche für Anlagentechnik - verfügbar sind. In der Gesamtbetrachtung ergibt sich somit eine Optimierungsaufgabe nach wirtschaftlichen und ökologischen Kriterien.

Folgende physikalisch bedingten Effekte wirken dem Erreichen der theoretisch minimal notwendigen Energiemenge für die Trocknung entgegen:

- ▶ Verluste durch Wärmeabgabe über Oberflächen der Apparate an die Umgebung lassen sich nicht vollständig verhindern und müssen deshalb durch zusätzliche Energiezufuhr kompensiert werden. Sie liegen aber meist ca. eine Zehnerpotenz unter der theoretisch minimal notwendigen Energiemenge für die Trocknung.
- ▶ Aufwendungen elektrischer Energie für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Stellantriebe sowie Regelungs- und Automatisierungstechnik lassen sich verringern (siehe entsprechende Kapitel des vorliegenden Dokumentes), aber nicht vollständig vermeiden. Sie liegen bezüglich der

Energiemenge meist ca. eine Zehnerpotenz unter der theoretisch minimal notwendigen Energiemenge für die Trocknung.

- Für Wärme- und Stoffübertragungsvorgänge sind immer örtliche Mindesttemperaturdifferenzen und Mindestkonzentrationsdifferenzen zu schaffen, deren Aufrechterhaltung Energie kostet.
- Das Trocknungsprodukt transportiert mit seiner inneren Energie einen Energiestrom nach außen.

Die erforderliche Technik trägt somit individuell auf den Anwendungsfall zugeschnittenen Systemcharakter. Beste verfügbare Technik erfordert deshalb eine zielorientierte Auswahl aus den im BVT-Dokument angegebenen Techniken nach den ebenfalls in BVT-Dokument beschriebenen Entscheidungswegen. Je nach konkreter Situation können verschiedene Techniken geeignet sein, die bestmögliche Energieeffizienz des Gesamtsystems zu erreichen.

Hierfür ist ein hohes Planungswissen erforderlich, welches in der Regel nur von einem Fachplaner erbracht werden kann.

#### A.10.4 Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Trocknern

Folgende Maßnahmen führen zu einer Steigerung der Energieeffizienz von Trocknungsprozessen und sollten Bestandteil des Planungsprozesses sein:

- Reduzierung der notwendigen Verdampfungsleistung durch vorgeschaltete mechanischer Trennverfahren vor Beginn des thermischen Trocknungsverfahrens und damit deutliche Senkung des thermischen Energiebedarfs (z. B. durch mechanische oder osmotische Entwässerung oder den Einsatz von adsorbierenden Substanzen (Zeolithe)).  
Die insgesamt benötigte Energie kann reduziert werden, indem eine optimale Menge der Flüssigkeit durch die weniger energieaufwändigen mechanischen Verfahren entfernt wird. Dadurch muss zum Erreichen des Zielflüssigkeitsgehaltes weniger Flüssigkeit durch das energieaufwändige Verdampfen entfernt werden. Alternativ kann auch geprüft werden, ob ggf. eine Erhöhung des Zielflüssigkeitsgehaltes sinnvoll ist. Dieser Ansatz wird jedoch die Ausnahme darstellen, da er unmittelbar in die Qualitätskriterien des Produktes sowie die weitere Verarbeitungsprozesse eingreift.
- Verringerung von Verlusten des thermischen Trocknungsvorganges.  
Die Energiezufuhr zu einem thermischen Trockner geschieht durch einen Stoffstrom hoher Temperatur (z. B. Abgas) oder durch elektrische Energie. Die Verringerung der Energieabfuhr bei gleichem Flüssigkeitsentzug senkt den Bedarf der Energiezufuhr und damit die Energieeffizienz der Trocknung.  
In Tabelle A.10-1 sind dafür grundsätzliche Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz angegeben.

Tabelle A.10-1: Grundsätzliche Einflussmöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz des thermischen Trocknungsvorgangs

| Abfuhr ungenutzter Energie und dadurch Effizienzverlust durch                | Verringerung der Energieabfuhr durch Maßnahme                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| In der verdampften Flüssigkeit gespeicherte Energie                          | Wärmerückgewinnung und möglichst Kondensation                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Übriger Energiestrom des energieversorgenden Stoffstroms (Hauptstrom Output) | Senkung der Temperatur durch Intensivierung des Stoff- und Wärmetransportes (interne Wärmerückgewinnung)<br>Interne und externe Masse- und Stofftransporte möglichst effektiv gestalten<br>Senkung der Temperatur durch interne oder externe Wärmerückgewinnung durch Wärmeübertragung an energiezuführend Medien |
| Austritt des energieversorgenden Energiestroms aus Leckagen                  | Vermeidung von Leckagen durch Konstruktion<br>Entfernung von Leckagen, die im Betrieb durch Alterung und Auflösung von Verbindungen entstehen                                                                                                                                                                     |

| Abfuhr ungenutzter Energie und dadurch Effizienzverlust durch                    | Verringerung der Energieabfuhr durch Maßnahme                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                  | Wartung der Anlagen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Wärmedurchgang durch Gehäuse des Trockners                                       | Wärmedämmung Die Art der Wärmedämmung und deren erforderliche Dicke sind von der Betriebstemperatur des Systems abhängig Die Wärmedämmung muss gewartet werden, da sie im Lauf der Zeit unter Versprödung, mechanischen Schäden, Wasser- und Dampfleckstellen oder dem Kontakt mit Chemikalien leiden kann. Beschädigte Wärmedämmung kann durch regelmäßige visuelle Inspektion oder Infrarot-Scannen erkannt werden. |
| Energieverluste von unterstützenden Einrichtungen (Ventilatoren, Förderantriebe) | Auslegung nach BVT für diese Querschnittstechnologien (siehe Kapitel 3.6 und 3.9 des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“)                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

- ▶ **Peripherie, insbesondere Effizienz von Arbeitsvorrichtungen**  
Bei den meisten Trocknungsprozessen werden Gase befördert. Das Fördern von Gasen ist an sich ein energieaufwändiger Prozess. Strömungswiderstände in Rohrleitungen, Verbindungsstücken und Armaturen, die entlang der Strömungsrichtung Druckverluste bewirken, müssen durch Aufprägung von Druckerhöhungen überwunden werden. Dies ist bei Gasen wegen deren Kompressibilität aufwändiger als bei Flüssigkeiten. Es ist deshalb auf die Auswahl von Ventilatoren, Kompressoren und Vakuumpumpen als Komponenten zur Druckerhöhung zu achten, die so ausgelegt sind, dass sie im Arbeitsbereich ihre beste Effizienz haben. Aber auch Pumpen für die Förderung von Flüssigkeiten und ihre Antriebe müssen effizient ausgelegt werden. Ebenso ist auf die Effizienz der elektrischen Antriebsmotoren für Transport- und Druckerhöhungsanlagen zu achten. Für die vorstehend benannten, bei Trocknungsprozessen eingesetzten Querschnittstechnologien sind deshalb die Maßnahmen zum Erreichen der bestmöglichen Energieeffizienz in den entsprechenden Fachkapiteln des vorliegenden Dokumentes bzw. des BVT-Merkblattes „Energieeffizienz“ zu beachten.
- ▶ **Wärmerückgewinnung im Zusammenhang mit Wärmezufuhr**  
Die gängigen Methoden der technischen Thermodynamik sind geeignet, um nach Effizienzgewinnen durch Wärmerückgewinnung zu suchen. Dabei geht es immer darum, Abwärme verwendbarer Temperatur mit Wärmeübertragern in den Prozess einzubinden und dabei Wärmebedarfe jeweils niedrigerer Temperatur zu decken.  
Da Trocknungsanlagen immer Bestandteil einer komplexen Anlage sind, ist hierzu eine Energiebilanzierung des Gesamtsystems sinnvoll. In jedem Fall muss der Bilanzrahmen des Effizienzvergleiches dafür ausreichend groß gezogen werden.

#### A.10.5 Angaben zu Trocknungsprozessen im Rahmen eines Antragsverfahrens

Zusammenfassend aus den Kapiteln A.10.1 bis A.10.4 lässt sich feststellen, dass Trocknungsprozesse in der Praxis stets Bestandteil einer komplexen Produktionslinie sind. Angaben zur Energieeffizienz bei ausschließlicher Betrachtung der Trocknungsanlage als Einzelaggregat benötigen individuelle verfahrenstechnische Auslegungen. Deren Prüfaufwand übersteigt jedoch in der Regel den behördlicherseits möglichen Rahmen. Weiterhin liegen keine allgemein gültigen Kennwerte als Vergleichsmaßstab für die Bewertung der Energieeffizienz von Trocknungsarten bzw. Trocknertypen bei industriellen Anlagen vor, da deren Auswahl wiederum verfahrenstechnisch geprägt ist.

Daher werden folgende Prüfinhalte im Rahmen eines Antragsverfahrens empfohlen:

- ▶ Wurde für die Auswahl und Einbindung des Trockenverfahrens ein Fachplaner hinzugezogen?
- ▶ Wurde eine Kombination von mechanischen und thermischen Trennprozessen zur Reduzierung des notwendigen Energieeinsatzes geprüft?

- ▶ Würde die Einbindung von Abwärme in bzw. aus anderen Prozessschritten in der Anlage geprüft?
- ▶ Ist eine Wärmedämmung vorgesehen?
- ▶ Erfolgt eine regelmäßige Wartung und Instandhaltung der Anlage zur Vermeidung von Anhaftungen, Leckagen und Beschädigung der Wärmedämmung?
- ▶ Sind die peripheren Einrichtungen wie Ventilatoren und Förderantriebe effizient ausgelegt?
- ▶ Ist eine Regelung für die Energiezufuhr und oder Temperatur zur Trocknung vorhanden, um die Zielkriterien des Trocknungsprozesses zu erreichen, aber nicht zu überschreiten?

## B. Literaturverzeichnis

1. **EIPPCB.** *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants.* [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP/JRC107769\\_LCP\\_bref2017.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP/JRC107769_LCP_bref2017.pdf) : European IPPC Bureau, 2017.
2. **VDMA.** *Leitfaden Energieeffizienz von Thermoprozessanlagen.* Frankfurt am Main : VDMA Thermoprozesstechnik, 2011.
3. **Dena.** *Energetische Modernisierung industrieller Wärmeversorgungssysteme. Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und der Energieeinsparung an großen feuerungstechnischen Anlagen.* Berlin : s.n., 2011. [www.industrie-energieeffizienz.de](http://www.industrie-energieeffizienz.de).
4. **Österreichische Energieagentur.** *Leitfaden für Energieaudits für betriebliche Abwärmenutzung.* Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.
5. **WS Wärmeprozessstechnik GmbH.** [www.flox.com](http://www.flox.com). [Online] 2017. [Zitat vom: 08. 11 2017.] <http://www.flox.com/de/prod/REKUMAT.html>.
6. **European Commission.** *WORKING DOCUMENT FOR THE ECODESIGN CONSULTATION FORUM ON INDUSTRIAL AND LABORATORY FURNACES AND OVENS (ENTR LOT 4).* Brüssel : s.n., 16 May 2014.
7. **Viessmann Werke, Allendorf (Eder).** *Planungshandbuch Dampfkessel.* Allendorf (Eder) : s.n., 2011.
8. **Sternberg, Jost, et al.** Kennzahlen zur Betriebsoptimierung von Kesselanlagen. *Band 8. , Energie aus Abfall.* Neuruppin : s.n., 2011.
9. **The United States Department of Energy, Advanced Manufacturing Office.** *Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry.* Washington, DC : s.n., 2012.
10. **Österreichische Energieagentur.** *Leitfaden für Energieaudits in Dampfsystemen.* Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015.
11. **Kalkkuhl, T.** *Strömungssimulation einer teilbeaufschlagten Dampfturbine.* Bochum : Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2014.
12. **U.S. Department of Energy.** *Steam Tip Sheet #22: Consider Installing High-Pressure Boilers with Backpressure Turbine-Generators.* Washington, DC : s.n., 2012.
13. **SPIRAX SARCO GmbH.** *Leitfaden für die Gestaltung von Dampf- und Kondensatnetzen, die Auswahl und den Einbau von Kondensatableitern, die Fehlersuche in Dampf- und Kondensatnetzen, den Betrieb von Dampf- und Kondensatanlagen.* Konstanz : s.n., 2012.
14. **DIN EN 12953-10:2003.** *Großwasserraumkessel - Teil 10: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität.* 2003.
15. **DIN EN 12952-12:2003.** *Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten - Teil 12: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität.* 2003.
16. **Franz Gysi AG.** *Dampf- und Kondensathandbuch. Nachschlagewerk für Planer und Betreiber von Dampfanlagen.* Suhr : s.n., 2011.
17. **SPIRAX SARCO GmbH.** *Grundlagen der Dampf- und Kondensattechnologie.* Konstanz : s.n., 2014.
18. **Berlin, Karsten.** *Handbuch für Dampf- und Kondensatanlagen (Verdichter).* [Online] 2009. [Zitat vom: 22. 03 2017.] <http://www.dampfundkondensat.de/pdf/Verdichter.pdf>.
19. **Europäische Kommission.** *Ecodesign. Preparatory Study on Steam Boilers (ENTR Lot 7).* Rom, Athen, Karlsruhe : s.n., 2014.

20. **U.S. Department of Energy.** *Steam Tip Sheet #26A: Consider Installing a Condensing Economizer.* Washington, DC : s.n., 2012.
21. **U.S. Departement of Energy.** *Steam Tip Sheet #3: Use Feedwater Economizers for Waste Heat Recovery.* Washington, DC : s.n., 2012.
22. **EIPPCB.** *Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency.* Sevilla. s.l. : European IPPC Bureau, 2009.
23. **VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen.** *VDI-Wärmeatlas. 11., bearbeitete und erweiterte Auflage.* Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2013. ISBN 978-3-642-19980-6.
24. **U.S. Department of Energy.** *Steam Tip Sheet #7: Clean Firetube Boiler Waterside Heat Transfer Surfaces.* Washington, DC : s.n., 2012.
25. **Trust, Carbon.** *Steam and high temperature hot water boilers. Introducing energy saving opportunities for business.* London : The Carbon Trust, 2012.
26. **SAENA.** *Technologien der Abwärmenutzung.* Dresden : s.n., 2016.
27. **BMW und BMU.** Referentenentwurf für das Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden. 2017.
28. **DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DI und VDE.** *DIN EN 61800-9-2 (VDE 0160-0190-2):2018-01 Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe - Teil 9-2: Ökodesign für Antriebssystem, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen - Indikatoren für die Energieeffizienz ...* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2018.
29. **Waide, Paul und Brunner, Conrad U.** *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems.* s.l. : Internatinal Energy Agency, 2011.
30. **DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee.** *IEC 60034-30-1:2014 (DIN EN 60034-30-1:2014-12 Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.
31. **ZVEI .** *Motoren und geregelte Antriebe; Normen und gesetzliche Anforderungen an die Energieeffizienz von Niederspannungs-Drehstrommotoren.* Frankfurt am Main : ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V., 2010.
32. **Danfoss Power Electronics A/S.** Handbuch VLT®-Frequenzumrichter - Wissenswertes über Frequenzumrichter. [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com). [Online] 01. 11 2015. [Zitat vom: 24. 05 2019.] <http://danfoss.ipapercms.dk/Drives/DD/Global/SalesPromotion/FWK/DE/FWK/?ref=17179944578&page=180>.
33. **Gotemann, Daniel.** [etz.de](http://www.etz.de). [Online] 2012. [Zitat vom: 11. 10 2016.] <http://www.etz.de/2891-0-Motoren+fuer+die+Energiewende.html>.
34. **REEL S.r.l A Socio Unico.** REEL SuPremE® - Der effizienteste magnetfreie Antrieb der Welt. [www.guetzold.com](http://www.guetzold.com). [Online] 2013. [Zitat vom: 28. 05 2019.] [https://www.guetzold.com/produkte/linkFile/Downloads/Service/reel-motoren/Brochure\\_REEL\\_SuPremE\\_de.pdf](https://www.guetzold.com/produkte/linkFile/Downloads/Service/reel-motoren/Brochure_REEL_SuPremE_de.pdf).
35. **Wortmann, Detlef (WEG Germany GmbH).** [www.etz.de](http://www.etz.de). *etz - Elektrotechnik + Automation.* [Online] 01. 12 2014. [Zitat vom: 25. 05 2019.] [https://www.etz.de/files/etz\\_ausgabe12-2014\\_energieeffiziente\\_motortechnologien\\_im\\_vergleich.pdf](https://www.etz.de/files/etz_ausgabe12-2014_energieeffiziente_motortechnologien_im_vergleich.pdf).
36. **DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE.** *DIN VDE 0530-30-2:2019-02 (VDE 0530-30-2:2019-02): Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-2:*



*Wirkungsgrad-Klassifizierung von Wechselstrommotoren mit variabler Drehzahl (IE-Code).* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2019.

37. **Brecher, Christian, et al.** Maschinenelemente und Baugruppen. [Buchverf.] Reimund Neugebauer. *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.* s.l. : Carl Hanser Verlag München Wien, 2014, S. 830.

38. **Die Kommission der Europäischen Gemeinschaft.** *Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.

39. **DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE.** *DIN CLC/TS 60034-31:2011-08 (VDE V 0530-31:2011-08): Drehende elektrische Maschinen - Teil 31: Auswahl von Energiesparmotoren einschließlich Drehzahlstellantrieben - Anwendungsleitfaden.* Berlin/ Frankfurt am Main : Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.

40. **Mau, Dipl.-Ing. Gunthart.** all-electronics. [Online] 28. 01 2014. [Zitat vom: 16. 01 2017.] <http://www.all-electronics.de/bremsenergie-eines-antriebs-abbauen-und-wiederverwerten-update/>.

41. **Huber, Heinrich.** *Transmission am Beispiel der Luftförderung.* Muttenz, Schweiz : s.n., 25. 11 2013.

42. **Almeida, Anibal T. de.** *EUP Lot 11 Motors.* Coimbra : ISR-University of Coimbra, 2008.

43. **BDEW.** *Energie - Info Industriestrompreise.* Berlin : Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e.V., 2015.

44. **Hirzel, Simon und Bradke, Harald.** Effizienter Einsatz von Druckluft. [Buchverf.] Reimund Neugebauer. *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion.* München; Wien : Hanser Verlag, 2014.

45. **Lämmer, Petra.** *Druckluft effizient nutzen.* Nürnberg : IHK Nürnberg für Mittelfranken, 2012.

46. **VDMA (eds).** *Druckluft effizient, Druckluft Abschlussbericht.* Berlin, Karlsruhe, Frankfurt : s.n., 2005.

47. **Kaeser, Kompressoren.** *Druckluftseminar Handbuch.* Coburg : s.n., 2016.

48. **Festo AG & Co. KG, et al.** EnEffAH-Abschlussbericht. *Förderkennzeichen BMWi 0327484A-E - Verbund-Nr. 01064392.* Esslingen [u. a.] : Technische Informationsbibliothek und Universitätsbibliothek, 2012.

49. **Elburg, Martijn van.** *Ecodesign - Electric motor systems / Compressors DG ENER Lot 31.* Brüssel : s.n., 2014.

50. **EnergieAgentur.NRW.** *Drucklufttechnik Potentiale zur Energieeinsparung.* Düsseldorf : Energieagentur.NRW, 2010.

51. **Meevissen, Matthias.** Die Pumpenförderung - Die nationale Klimaschutzinitiative. [Online] 2017. [http://www.btga.de/files/Diverses/180124\\_BTGA\\_WILO\\_FFM.pdf](http://www.btga.de/files/Diverses/180124_BTGA_WILO_FFM.pdf).

52. **DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee.** *DIN EN ISO 17769-1 (2012-11-00) Flüssigkeitspumpen und -installation - Allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten - Teil 1: Flüssigkeitspumpen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

53. —. *DIN EN ISO 17769-2 (2012-11-00) Flüssigkeitspumpen und -installation - Allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten - Teil 2: Pumpensysteme.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.

54. **Hilse, Hagen et. al.** Aktualisierung der Daten des BVT-Merkblattes Energy Efficiency. Dessau : Umweltbundesamt, 2019.



55. **Deutsche Energie-Agentur (dena)**. Ratgeber „Pumpen und Pumpensysteme für Industrie und Gewerbe“. [Online] <https://vdocuments.site/ratgeber-pumpen-industrie-und-gewerbe.html>.
56. **Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. VDMA 24199 (2005-05-00)** *Regelungstechnische Anforderungen an die Hydraulik bei Planung und Ausführung von Heizungs-, Kälte-, Trinkwasser- und Raumluftechnischen Anlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005.
57. **DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), Heating and Ventilation Technology Standards Committee**. *DIN EN 14336 (2005-01-00) Heizungsanlagen un Gebäuden - Installation und Abnahme der Warmwasser-Heizungsanlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2005.
58. **DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), Heating and Ventilation Technology Standards Committee**. *DIN V 4701-10 (2003-08-00) Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003.
59. **DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), DIN Standards Committee Building and Civil Engineering**. *DIN 18380 (2016-09-00) VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV) - Heizanlagen und zentrale Wassererwärmungsanlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.
60. **Kameler, Schönwald, Heinze**. *Klassifizierung von Pumpen*. Düsseldorf : Fachhochschule Düsseldorf, 2013.
61. **Wolfgang Ernhof, Matthias Back**. Was sind Kreislumpen und für welche Anwendungen werden sie verwendet? [Online] 2018. <https://www.process.vogel.de/was-sind-kreiselpumpen-und-fuer-welche-anwendungen-werden-sie-verwendet-a-681185/>.
62. **GRUNDFOS GmbH**. Pumpenhandbuch. [Online] 2012. [http://machining.grundfos.de/media/60727/grundfos\\_pumpenhandbuch.pdf](http://machining.grundfos.de/media/60727/grundfos_pumpenhandbuch.pdf).
63. **DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee**. *DIN EN 733 (1995-08-00) Kreislumpen mit axialem Eintritt PN 10 mit Lagerträger - Nennleistung, Hauptmaße, Bezeichnungssystem*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1995.
64. **DIN-Normenausschuss-Maschinenbau (NAM), Mechanical Engineering Standards Committee**. *DIN EN ISO 2858 (2011-12-00) Kreislumpen mit axialem Eintritt (PN 16) - Bezeichnung, Nennleistung und Abmessungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.
65. **KSB SE & Co. KGaA**. Kreislumpenlexikon - Verdrängerpumpen. [Online] <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/verdraengerpumpe/186552/>.
66. **Herold & Co. GmbH**. Vorteile/nachteile gebräuchlicher Pumpentypen. [Online] <http://www.herold-gefree.de/de/drehkolbenpumpe/vorteilenachteile>.
67. **Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)**. Ratgeber „Pumpen und Pumpensysteme für Industrie und Gewerbe“. [Online] 2010. [1372\\_FS\\_Leuchtturmprojekt\\_Pumpen.pdf](#).
68. **Wilo Schweiz AG**. Pumpenfibei - Grundlagen der Pumpentechnik. [Online] 2016. [http://www.wilo.ch/fileadmin/ch/Pumpenfibei\\_DE\\_LR.pdf](http://www.wilo.ch/fileadmin/ch/Pumpenfibei_DE_LR.pdf).
69. **Europäische Parlament, Rat der Europäischen Union**. *Richtlinie 2009/125/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte*. s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2009.
70. **Europäische Kommission**. *Verordnung (EU) Nr. 547/2012 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von*

*Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Wasserpumpen.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Kommission, 2012.

71. —. *Verordnung (EU) Nr. 622/2012 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integr.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Kommission, 2012.

72. —. *Verordnung (EU) Nr. 4/2014 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 640/2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltg.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2014.

73. **Erich Meyer, Thomas Kasper.** Instandhaltung und Energieeffizienz von Pumpensystemen. [Online] verlag moderne industrie GmbH. <https://www.instandhaltung.de/instandhaltung-und-energieeffizienz-von-pumpensystemen/>.

74. **KSB SE & Co. KGaA.** Bedarfsgerechter Betrieb mit einer Pumpensteuerung von KSB. [Online] KSB SE & Co. KGaA. [https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte\\_Leistungen/Produktbauarten/Pumpensteuerung/](https://www.ksb.com/ksb-de/Produkte_Leistungen/Produktbauarten/Pumpensteuerung/).

75. —. *Kreiselpumpenlexikon - Lebenszykluskosten.* [Online] <https://www.ksb.com/kreiselpumpenlexikon/lebenszykluskosten/187332/>.

76. **Hydraulic Institute, Europump, US Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT).** Pump Life Cycle Costs Guide. *europump.net*. [Online] 12 2000. [Zitat vom: 06. 06 2019.] [https://europump.net/uploads/order%20forms/LCC\\_Executive\\_Summary.pdf](https://europump.net/uploads/order%20forms/LCC_Executive_Summary.pdf).

77. **Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).** *Lebenszykluskosten von Pumpen und Pumpensystemen.*

78. **VDMA.** Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Ventilatoren und Lüftungssystemen. 2017.

79. **DIN-Normenausschuss.** *DIN EN 16798-3:2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4).* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.

80. —. *DIN EN 12599:2013-01 Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe raumluftechnischer Anlagen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.

81. **VDMA, Arbeitsgemeinschaft Instandhaltung Gebäudetechnik.** Instandhaltungs-Information Nr. 22: . *Beitrag der Instandhaltung zum effizienten Anlagenbetrieb und zu den Betriebskosten/Lebenszykluskosten.* 2016.

82. **Europäische Kommission.** *Verordnung (EU) Nr. 327/2011 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Ventilatoren, die durch Motoren mit einer elektrischen.* s.l. : Amtsblatt der Europäischen Union, 2011.

83. **Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).** *Ratgeber "Lufttechnik für Industrie und Gewerbe".* Berlin : s.n., 2010.

84. **Gemeinschaftsarbeitsausschuss NABau/FNL/NHRS.** *DIN V 18599-2:2016-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016.

85. **Technisches Komitee CEN/TC 228.** *DIN EN 12831-1: 2017-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.

86. —. *DIN EN 12828: 2012+A1: 2014 Heizungsanlagen in Gebäuden - Plaung von Wasser-Heizungsanlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014.
87. **Schiller, Heiko und Mai, Ronny**. *Abschlussbericht - Berechnungs-Algorithmen für Freie und Regenerative Kühltechnologien in Nichtwohngebäuden*. Dresden : Institut für Luft- und Kältetechnik gemeinnützige Gesellschaft mbH, 2011.
88. **Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)**. *VDMA 24247-6: 2018-02 Energieeffizienz von Kälteanlagen - Teil 6: Klimakälte*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018.
89. **Technischen Komitee CEN/TC 156**. *DIN EN 16798-3: 2017-11 Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme (Modul M5-1, M5-4)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.
90. **Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik (NHRS) im DIN**. *DIN SPEC 15240: 2013-10 Lüftung von Gebäuden - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Energetische Inspektion von Klimaanlageanlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013.
91. **Technisches Komitee ISO/TC 142**. *DIN EN ISO 16890-1: 2017-08 Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.
92. **Normausschuss Technische Grundlagen (NATG) in DIN**. *DIN 31051: 2012-09 Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012.
93. **Technisches Komitee CEN/TC 228**. *DIN EN 15378-1: 2017-09 Energetische Bewertung von Gebäuden - Heizungsanlagen und Trinkwassererwärmung in Gebäuden - Teil 1: Inspektion von Kesseln, Heizungsanlagen und Trinkwassererwärmung, Module M3-11, M8-11*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017.
94. **Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV)**. *Beleuchtung 2016 - Hinweise für Beleuchtung öffentlicher Gebäude*. [Online] 02 2017. [Zitat vom: 13. 06 2018.] [https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Elektrotechnik/Beleuchtung%202016/Beleuchtung-2016\\_Stand\\_2017.pdf](https://www.amev-online.de/AMEVInhalt/Planen/Elektrotechnik/Beleuchtung%202016/Beleuchtung-2016_Stand_2017.pdf).
95. **licht.de – eine Brancheninitiative des ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.** *Lichtplanung in der Praxis*. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] <https://www.licht.de/de/licht-fuer-profis/lichtplanung/planung-in-der-praxis/>.
96. **Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena)**. *Lotse Straßenbeleuchtung - Maßnahmenbewertung nach Lebenszykluskosten*. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] <https://industrie-energieeffizienz.de/energiekosten-senken/energieeffiziente-technologien/beleuchtung/quickcheck/planungsschritte-strassenbeleuchtung/planung-finanzierung/massnahmenbewertung-nach-lebenszykluskosten/>.
97. **TRILUX GmbH & Co. KG**. *Leuchtmittelarten*. [Online] [Zitat vom: 13. 06 2018.] <https://www.trilux.com/de/beleuchtungspraxis/leuchtmittel/leuchtmittelarten/>.
98. **Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften**. *Verordnung 244/2009/EG zu Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht*. [Online] *Ergänzungen des Umweltbundesamtes (Vers. 4, 16. 6. 2014), 16. 06 2014*. [Zitat vom: 13. 06 2018.] [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/verordnung\\_244\\_2009\\_eg\\_haushaltslampen\\_mit\\_ungebuendeltem\\_licht\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/verordnung_244_2009_eg_haushaltslampen_mit_ungebuendeltem_licht_0.pdf).

99. **Dena, (Deutsche Energie-Agentur GmbH).** *Initiative Energieeffizienz - Druckluftsysteme in der Industrie un Gewerbe.* Berlin : Dena (Deutsche Energie-Agentur GmbH), 2012.

TEXTE