

DIN EN 17038-2

ICS 23.080

Einsprüche bis 2017-03-13

Entwurf

**Pumpen –
Methoden zur Qualifikation und Verifikation des Energieeffizienzindex
für Kreiselpumpen –
Teil 2: Prüfung und Berechnung des Energieeffizienzindex (EEI)
einzelner Pumpenaggregate;
Deutsche und Englische Fassung prEN 17038-2:2016**

Pumps –
Methods of qualification and verification of the Energy Efficiency Index for rotodynamic
pumps units –
Part 2: Testing and calculation of energy Efficiency Index (EEI) of single pump units;
German and English version prEN 17038-2:2016

Développement, validation de l'application d'un modèle semi-analytique pour la
détermination de l'efficacité énergétique des groupes motopompes à eau –
Partie 2: Unités de pompes simples;
Version allemande et anglaise prEN 17038-2:2016

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-01-13 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-
Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de,
sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nam@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im
Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-
Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM), 60498 Frankfurt am Main,
Postfach 71 08 64, Lyoner Str. 18, 60528 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 127 Seiten

DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)

Nationales Vorwort

Dieser Norm-Entwurf ist Teil 2 einer Reihe von Normen und beschreibt Methoden zur Berechnung und Messung des Energieeffizienzindex (EEI) für einzelne Pumpenaggregate.

Er beinhaltet die Deutsche Fassung der vom Technischen Komitee CEN/TC 197 „Pumpen“ im Europäischen Komitee für Normung (CEN) ausgearbeiteten prEN 17038-2:2016.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN 17038-2 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Die nationalen Interessen bei der Erarbeitung werden vom Ausschuss NA 060-11-01 AA „Kreiselpumpen“ im Fachbereich „Pumpen“ des DIN-Normenausschusses Maschinenbau (NAM) wahrgenommen. Vertreter der Hersteller und Anwender von Pumpen sowie der Berufsgenossenschaften sind an der Erarbeitung beteiligt.

Dieser Norm-Entwurf konkretisiert einschlägige Anforderungen von Anhang I der EU-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG an erstmals im Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) in Verkehr gebrachte Maschinen, um den Nachweis der Übereinstimmung mit diesen Anforderungen zu erleichtern.

Die im Abschnitt 2 und den Literaturhinweisen zitierten Europäischen Normen sind als DIN-EN- bzw. DIN-EN-ISO-Normen mit gleicher Zählnummer veröffentlicht.

Für die zitierten Internationalen Normen, sofern sie nicht als DIN-ISO-Normen mit gleicher Zählnummer veröffentlicht sind, gibt es keine nationalen Entsprechungen.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

Presentation zur Energieeffizienz bei motorgetriebenen Systemen; EEMODS Conference, <http://iet.jrc.ec.europa.eu/energyefficiency/conference/6th-international-conference-energy-efficiency-motor-driven-systems-eemods%E2%80%999909>

DIN EN 61800-2 (VDE 0160-102), *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe — Teil 2: Allgemeine Anforderungen — Festlegungen für die Bemessung von Niederspannungs-Wechselstrom-Antriebssystemen mit einstellbarer Frequenz*

Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 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

Pumpen — Methoden zur Qualifikation und Verifikation des Energieeffizienzindex für Kreiselpumpen — Teil 2: Prüfung und Berechnung des Energieeffizienzindex (EEI) einzelner Pumpenaggregate

Développement, validation de l'application d'un modèle semi-analytique pour la détermination de l'efficacité énergétique des groupes motopompes à eau — Partie 2 : Unités de pompes simples

Pumps — Methods of qualification and verification of the Energy Efficiency Index for rotodynamic pumps units — Part 2: Testing and calculation of energy Efficiency Index (EEI) of single pump units

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8f

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Durchflusszeit-Profile und Referenz-Regelkennlinien des Drucks	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Bezugs-Durchflusszeit-Profile	9
4.3 Referenz-Regelkennlinien des Drucks	10
5 Bestimmung der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme $P_{1,avg}$ durch Prüfung	10
5.1 Allgemeines	10
5.1.1 Prüfanforderungen	10
5.1.2 Prüfbedingungen	11
5.1.3 Messinstrumente	12
5.2 Berechnung der Lastpunkte	12
5.2.1 Allgemeines	12
5.2.2 Bestimmung von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$	13
5.2.3 Bestimmung der Teillast- und Überlastpunkte sowie der Referenz-Regelkennlinie	14
5.3 Berechnung von $P_{1,avg}$	14
5.3.1 Allgemeines	14
5.3.2 Mit dem Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit konstanter Strömung bewertete Pumpenaggregate	15
5.3.3 Mit dem Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit variabler Strömung bewertete Pumpenaggregate	15
5.3.4 Verfahren zur Prüfung und Bewertung von Pumpenaggregaten mit besonderen Pumpentypen	17
6 Bestimmung des Energieeffizienzindex von Pumpenaggregaten anhand des semi-analytischen Modells	17
6.1 Allgemeines	17
6.2 Das semi-analytische Modell der Pumpe	18
6.3 Pumpenaggregate im Betrieb mit fester Drehzahl	20
6.3.1 Allgemeines	20
6.3.2 Das Modell des Elektromotors	21
6.3.3 Interaktion von Pumpe und Motor	22
6.3.4 Bestimmung von $Q_{100\%}$ aus Q_{BEP}	23
6.3.5 Bestimmung des $P_{1,avg,c}$ -Werts	24
6.4 Pumpenaggregate mit einem Leistungsantriebssystem (PDS)	25
6.4.1 Allgemeines	25
6.4.2 Das Modell des Leistungsantriebssystems (PDS)	27
6.4.3 Interaktion zwischen Pumpe und PDS	30
6.4.4 Bestimmung von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$ anhand Q_{BEP} und H_{BEP}	31
6.4.5 Bestimmung von $P_{1,avg,v}$ und $P_{1,avg,c}$ für Pumpenaggregate mit PDS	32

7	Bestimmung der elektrischen Bezugs-Leistungsaufnahme $P_{1,ref}$	32
8	Berechnung des Energieeffizienzindex (EEI)	35
Anhang A (normativ) Anwendungsbereich		36
Anhang B (informativ) Bestimmung zusätzlicher stützender Punkte für das semi-analytische Modell auf Grundlage empirischer Korrelationen		38
B.1	Zusätzliche stützende Punkte für Pumpen mit axialem Eintritt (Pumpentypen ESOB, ESCC und ESCCi)	40
B.1.1	Zusätzliche stützende Punkte bei $Q/Q_{BEP} = 0,25$	40
B.1.2	Zusätzliche stützende Punkte bei $Q/Q_{BEP} = 0,1$	40
B.2	Zusätzliche stützende Punkte für mehrstufige vertikale Wasserpumpen	40
B.2.1	Zusätzliche stützende Punkte bei $Q/Q_{BEP} = 0,25$	40
B.2.2	Zusätzliche stützende Punkte bei $Q/Q_{BEP} = 0,1$	41
B.3	Maximale Modellunsicherheiten	41
Anhang C (normativ) Synthese der stützenden Punkte für das PDS aus separaten Daten zu Motor und CDM		45
C.1	Allgemeines	45
C.2	Bestimmung der Verluste $P_{L,CDM}$ an den 3 für das PDS-Modell erforderlichen stützenden Punkten	48
C.3	Bestimmung der Verluste $P_{L,PDS}$ an den 3 für das PDS-Modell erforderlichen stützenden Punkten	49
Anhang D (informativ) Unsicherheiten und Toleranzen der EEI-Werte		50
D.1	Allgemeine Erläuterungen	50
D.2	Die Messunsicherheit des durch Prüfung ermittelten EEI-Werts	50
D.3	Die Unsicherheit des durch Anwendung der Modelle ermittelten EEI-Werts	53
D.3.1	Allgemeines	53
D.3.2	Betriebsart: feste Drehzahl	53
D.3.3	Betriebsart: variable Drehzahl	54
D.4	Gesamttoleranz des mittleren EEI-Werts	55
D.4.1	Bestimmung des mittleren EEI-Werts durch Prüfung ausschließlich eines Pumpenaggregats	55
D.4.2	Bestimmung des mittleren EEI-Werts durch Prüfung einer Probe aus M Pumpenaggregaten der gleichen Typenreihe	57
D.4.3	Bestimmung des mittleren EEI-Werts durch Anwendung des semi-analytischen Modells	57
Anhang E (informativ) Mathematische Lösung von Polynomgleichungen dritten Grades		60
Anhang F (normativ) CDM-Modell-Ersatzwerte für das semi-analytische Modell		62
Literaturhinweise		63

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 17038-2:2016) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 197 „Pumpen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinien.

Einleitung

Diese Europäische Norm ist der zweite Teil einer Normenreihe, die eine Methodologie zur Bewertung der Energieeffizienzleistung von Pumpenaggregaten, einschließlich Pumpe und Motor mit oder ohne Frequenzumformer, auf Grundlage eines nicht dimensional numerischen Werts, dem sogenannten Energieeffizienzindex (EEI) beschreibt. Ein EEI ermöglicht die Gegenüberstellung unterschiedlicher Pumpengrößen und -typen mit einem gemeinsamen Anzeiger. Physikalische Einflüsse, wie Pumpengröße, spezifische Drehzahl, Teillast-Betrieb des Pumpenaggregats, Wirkungsgrad der Motorleistung und der Einfluss des Frequenzumformers werden in diese Kennzahl integriert.

Spezifische Anforderungen an Prüfungen und ein Berechnungsverfahren für einen EEI, das so genannte semi-analytische Modell eines vollständigen einzelnen Pumpenaggregats, sowie spezifische Durchflusszeit-Profile und Referenz-Regelkennlinien werden in diesem Teil der Norm festgelegt.

Der EEI ist ein Index, um Pumpenaggregate entsprechend ihrer Energieeffizienz auszulegen; er ersetzt jedoch nicht die Notwendigkeit einer Lebensdauerkostenanalyse hinsichtlich des Energieverbrauchs im Laufe der Lebensdauer eines Pumpenaggregats.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm legt Methoden und Verfahren für die Prüfung, Berechnung und Bestimmung des Energieeffizienzindex (EEI) von Trockenläufer-Kreiselpumpenaggregaten zum Pumpen von sauberem Wasser fest, auch wenn sie in andere Produkte integriert sind.

Die von dieser Norm behandelten Pumpentypen und -größen werden im normativen Anhang A aufgeführt.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN ISO 17769-1, *Flüssigkeitspumpen und -installationen — Allgemeine Begriffe, Definitionen, Größen, Formelzeichen und Einheiten — Teil 1: Flüssigkeitspumpen (ISO 17769-1:2012)*

EN ISO 9906:2012, *Kreiselpumpen — Hydraulische Abnahmeprüfungen — Klassen 1, 2 und 3 (ISO 9906:2012)*

EN 16480, *Pumpen — Geforderte Mindesteffizienz bei Kreiselpumpen für Wasser*

FprEN 17038-1, *Pumpen — Methoden zur Qualifikation und Verifizierung des Energieeffizienzindex für Kreiselpumpen — Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Vorgehensweisen zur Prüfung und Berechnung des Energieeffizienzindex (EEI)*

EN 60034-1, *Drehende elektrische Maschinen — Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten*

EN 60034-30-1, *Drehende elektrische Maschinen — Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code) (IEC 60034-30-1:2014)*

EN 60034-2-1, *Drehende elektrische Maschinen — Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge) (IEC 60034-2-1:2014)*

EN 60034-2-2, *Drehende elektrische Maschinen — Teil 2-2: Besondere Verfahren zur Bestimmung der Einzelverluste großer elektrischer Maschinen aus Prüfungen — Ergänzung zu IEC 60034-2-1*

IEC TS 60034-2-3, *Rotating electrical machines — Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motors*

EN 60038, *CENELEC-Normspannungen*

FprEN 61800-9-1, *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe — Teil 9-1: Energieeffizienz für Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen — Allgemeine Anforderungen für die Erstellung von Normen zur Energieeffizienz von Ausrüstungen mit Elektroantrieb nach dem erweiterten Produktansatz (EPA) und semi-analytischen Modellen (SAM)*

FprEN 61800-9-2, *Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe — Teil 9-2: Ökodesign für Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen — Indikatoren für die Energieeffizienz von Antriebssystemen und Motorstartern*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN ISO 17769-1 und die folgenden Begriffe.

3.1

Wirkungsgrad des Geräts

Abgabe hydraulischer Leistung geteilt durch elektrische Leistungsaufnahme, im Englischen auch „wire to water efficiency“ bezeichnet

$$\eta_{\text{unit}} = P_{\text{hyd}}/P_1$$

3.2

Betrieb bei konstanter Strömung

leichte Schwankungen der Durchflussmenge um den Nennwert

Anmerkung 1 zum Begriff: Aufgrund sekundärer, verfahrensbedingter Einflüsse, wie (mäßig) unterschiedlicher Flüssigkeitsfüllstände in den Speichern usw., kommt es gewöhnlich zu Schwankungen der Durchflussmenge innerhalb jenes Bereichs, für den die Definition und Bestimmung des Mindesteffizienzindex (MEI) der Pumpe gilt, siehe EN 16480, und der von $0,75 \cdot Q_{100\%}$ bis $1,1 \cdot Q_{100\%}$ reicht.

3.3

variable Strömung

stark schwankende Durchflussmenge

Anmerkung 1 zum Begriff: In der Regel ist bei beträchtlichen Anteilen der Gesamtbetriebszeit der tatsächliche Bedarf für die Durchflussmenge der Pumpe Q und die Energiehöhe der Pumpe H viel geringer als die Werte am Betriebspunkt des maximalen Förderstroms, der von der Anwendung gefordert ist.

3.4

hydraulische Leistung

gewöhnliche Angabe des arithmetischen Produkts der Strömung Q , der Energiehöhe H und einer Konstanten

Anmerkung 1 zum Begriff:

$$P_{\text{hyd}} = \rho_w \cdot g \cdot \left(\frac{Q}{3600} \right) \cdot H$$

Dabei ist

P_{hyd} die hydraulische Leistung [W];

Q die Strömung [m³/h];

H die Gesamtenergiehöhe [m];

ρ_w die Dichte des Prüfwassers 1 000 kg/m³;

g die Gravitationskonstante 9,81 m/s².

3.5

maximale hydraulische Leistung

absolute maximale $P_{\text{hyd,max}}$ der hydraulischen Leistung eines Pumpenaggregats

3.6

Reihe von Parametern, die bewirken, dass das Pumpenaggregat die Linie maximaler hydraulischer Leistung erzeugt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Pumpenaggregat muss in der Lage und so ausgelegt sein, das es dauerhaft unter Höchstleistung in Betrieb ist.

3.7

Punkt des besten Wirkungsgrads des Pumpenaggregats, ($Q_{BEP,unit}/H_{BEP,unit}$)

Strömung-Energiehöhe-Punkt, an dem das Pumpenaggregat mit Bestwirkungsgrad und Höchstleistung in Betrieb ist

3.8

Bezugs-Durchflussmenge, $Q_{100\%}$

Strömung je Zeiteinheit [m^3/s] am Punkt des besten Wirkungsgrads (BEP) des Geräts

3.9

Bezugs-Energiehöhe, $H_{100\%}$

Gesamtenergiehöhenunterschied [m] am Punkt des besten Wirkungsgrads (BEP) des Geräts

3.10

Durchflusszeit-Profil

Perzentilmuster der Zeit, bei dem das Pumpenaggregat mit einer bestimmten Durchflussmenge läuft

3.11

vollständiges Antriebsmodul (CDM, en: Complete Drive Module)

Stromrichter, der zwischen die Stromversorgung und einen Motor sowie Erweiterungen, wie Schutzvorrichtungen, Umformer und Hilfsgeräte, angeschlossen ist (nach EN 61800-2)

3.12

Leistungsantriebssystem (PDS, en: Power Drive System)

Kombination aus CDM und Motor

4 Durchflusszeit-Profile und Referenz-Regelkennlinien des Drucks

4.1 Allgemeines

Bei Inbetriebnahme einzelner Pumpenaggregate muss ein angemessener EEI-Wert zur Verfügung gestellt werden. Der EEI muss je nach Bedarf der Anwendung, in der das Pumpenaggregat betrieben wird oder für die das Pumpenaggregat konzipiert ist, wenn es auf den Markt gebracht wird, für variable Strömung (EEI_V) und/oder konstante Strömung (EEI_C) ausgelegt sein. Zur Bestimmung des EEI_V oder EEI_C sind die jeweiligen Durchflusszeit-Profile und Referenz-Regelkennlinien des Drucks, die in Tabelle 1 angegeben sind, anzuwenden.

Tabelle 1 — Bezugs-Lastfluss-Profile und Referenz-Regelkennlinien des Drucks für einzelne Pumpenaggregate

Betriebsart			Bezugs-Durchflusszeit-Profil	Referenz-Druckkennlinie	Anwendbare Q/H -Prüfpunkte	EEI anzuwenden
#	Anwendungsbedarf	Typ Pumpenaggregat				
M1	konstante Strömung	feste Drehzahl	konstante Strömung (Tabelle 2)	Q/H -Kennlinie des Pumpenaggregats	Auf Q/H -Kennlinie des Pumpenaggregats	EEI_C
M2	variable Strömung	feste Drehzahl	variable Strömung (Tabelle 3)	Gleichung (1)	Auf Q/H -Kennlinie des Pumpenaggregats	EEI_V
M3	konstante Strömung	variable Drehzahl	konstante Strömung (Tabelle 2)	Q/H -Kennlinie des Pumpenaggregats	Auf Q/H -Kennlinie des Pumpenaggregats (gemessen bei fester Drehzahl)	EEI_C
M4	variable Strömung	variable Drehzahl	variable Strömung (Tabelle 3)	Gleichung (1)	Q/H -Punkte auf Kennlinie definiert mit Gleichung (1)	EEI_V
M5	konstante Strömung, wechselnde Energiehöhe	variable Drehzahl	variable Strömung (Tabelle 3)	Gleichung (1)	Q/H -Punkte auf Kennlinie definiert mit Gleichung (1)	EEI_V

Falls eine Pumpe mit freiliegender Welle alleine *auf den Markt gebracht* werden soll, muss der EEI mit einem Referenzmotor (siehe Klasse „IE3“ in EN 60034-30-1) in Betriebsart M1 abhängig von der Nenndrehzahl der Pumpe mit freiliegender Welle (entweder 2-poliger Motor für die Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PU} = 2\,900\,1/\text{min}$ oder 4-poliger Motor für die Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PU} = 1\,450\,1/\text{min}$) bestimmt werden. Der Referenzmotor muss über eine Nennleistungsausgabe verfügen, die der Leistung der Welle bei Nennbetriebsbedingungen entspricht.

4.2 Bezugs-Durchflusszeit-Profile

Das Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit konstanter Strömung ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 — Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit konstanter Strömung

Strömung Q in % von $Q_{100\%}$	75	100	110
Zeit Δt in % der Gesamtbetriebszeit	25	50	25

Das Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit variabler Strömung ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3 — Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit variabler Strömung

Strömung Q in % von $Q_{100\%}$	25	50	75	100
Zeit Δt in % der Gesamtbetriebszeit	44	35	15	6

4.3 Referenz-Regelkennlinien des Drucks

Bei Bedarf der variablen Strömung wird die Referenz-Regelkennlinie mithilfe der Gleichung (1) bestimmt.

$$H_i/H_{100\%} = 100 \cdot [0,5 + 0,5 \cdot (Q/Q_{100\%})] \quad [\%] \quad (1)$$

Die Werte $H_i/H_{100\%}$ bei entsprechenden Werten von $Q_i/Q_{100\%}$ des Bezugs-Durchflusszeit-Profils werden nach Gleichung (1) ermittelt.

Die von Gleichung (1) festgelegten Referenz-Regelkennlinien des Drucks mit den entsprechenden hydraulischen Lastpunkten aus Tabelle 2 und 3 in numerischer Form werden graphisch in Abschnitt 5, Bild 2 dargestellt.

Im Falle der Betriebsart mit konstanter Strömung ist die Referenz-Regelkennlinie die Q/H-Kennlinie des tatsächlichen Pumpenaggregats, die angewendet wird, um $Q_{100\%}$, $H_{100\%}$ (siehe auch Abschnitt 5, Bild 1) zu bestimmen.

Bei Bedarf konstanter Strömung mit wechselnder Energiehöhe (Betriebsart M5) wird die Referenz-Regelkennlinie mit Gleichung (1) bestimmt.

5 Bestimmung der mittleren elektrischen Leistungsaufnahme $P_{1,avg}$ durch Prüfung

5.1 Allgemeines

5.1.1 Prüfanforderungen

Dieser Abschnitt legt Leistungsprüfungen und -bewertungen für Pumpenaggregate fest, die

- von einem Unternehmen ausgeführt werden, das die Pumpenaggregate auf den Markt bringt und/oder in Betrieb nimmt
- oder von einer unabhängigen Einrichtung im Rahmen des in prEN 17038-1:2016, Abschnitt 6 beschriebenen Verifizierungsverfahrens.

Diese Prüfungen müssen die erforderlichen Angaben zu den Werten der tatsächlichen Leistung von Prüfpumpenaggregaten, die für die Berechnung des EEI-Werts entsprechend seiner Definition in prEN 17038-1:2016, Abschnitt 4 notwendig sind, liefern.

Alle Vorkehrungen für die Prüfung, die die Pumpe betreffen, müssen mit EN ISO 9906, Klasse 2 übereinstimmen. Die Ausnahmebedingung für eine Eingangsleistung von 10 kW und niedriger (wie sie für die Anwendung in Abnahmeprüfungen nach EN ISO 9906 zulässig ist) darf nicht gelten.

Alle Vorkehrungen für die Prüfung, die einen Elektromotor betreffen, sofern dieser Teil des Pumpenaggregats ist und direkt aus dem Stromnetz gespeist wird, müssen mit EN 60034-2-1 übereinstimmen.

Alle Vorkehrungen für die Prüfung, die ein Leistungsantriebssystem betreffen, sofern dieses Teil des Pumpenaggregats ist, müssen mit FprEN 61800-9-2 übereinstimmen.

5.1.2 Prüfbedingungen

Die Prüfungen sind mit sauberem kaltem Wasser durchzuführen. Die Leistung einer Pumpe richtet sich deutlich nach der Art der gepumpten Flüssigkeit. Es können keine allgemeinen Regeln gegeben werden, ob Ergebnisse zur Leistung aus Messungen mit sauberem kaltem Wasser so umgewandelt werden können, dass sie die Leistung bei Wasser mit anderen Eigenschaften (Temperatur, Feststoff- oder Gasgehalt) sowie anderen Flüssigkeiten voraussagen.

Die Dauer der Prüfung muss hinlänglich sein, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen; insbesondere Einlauf- und Aufwärmwirkungen der elektrischen und elektronischen Bauteile des Geräts sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG 1 Einlaufauswirkungen können bis zu einen Tag Betriebszeit beanspruchen.

Alle Messungen müssen unter stationären Zuständen (siehe EN ISO 9906, EN 60034-2-1, EN 60034-2-2 und IEC TS 60034-2-3 sowie FprEN 61800-9-2) vorgenommen werden.

ANMERKUNG 2 prEN 61800-9-2 lässt das Aufwärmen des PDS zur Messung des Nennpunktes zu. Alle anderen Punkte können unmittelbar nach der Messung der maximalen Last gemessen werden, ohne dass auf einen stationären Zustand zu warten ist.

Die Prüfungen sollten unter Bedingungen ausgeführt werden, unter denen Kavitationen nicht die Leistung der Pumpe beeinflussen.

ANMERKUNG 3 Falls es in der Prüfpumpe während der Prüfung Kavitationen in merklichem Umfang gibt, kann sich nicht nur die Energiehöhe der Pumpe, sondern auch der Pumpenwirkungsgrad und die Leistungsaufnahme verschlechtern, wodurch die Energieeffizienz des Pumpenaggregats unterschätzt wird.

In Fall 1 von 5.2.1 (durch eine Stromversorgung gespeister Motor mit konstanter Frequenz) muss die Stromversorgung der Prüfinstallation die in EN 60034-1 festgelegten Anforderungen erfüllen. Dies setzt voraus, dass

- die Spannung mit 7.2 in EN 60038 und EN 60034-1 übereinstimmen muss,
- die Frequenz innerhalb $\pm 0,3$ % der Bemessungsfrequenz während Messungen liegen muss.

In Fall 2 von 5.2.1 (PDS, d. h. Motor kombiniert mit und gespeist von einem CDM) müssen die folgenden Anforderungen in Übereinstimmung mit FprEN 61800-9-2 erfüllt sein:

- Bei Prüfung eines PDS unter der Last der Pumpe können langsame Schwankungen der gemessenen Größen nicht zu vermeiden sein. Deshalb müssen für jeden Lastpunkt mehrere Messungen über einen Zeitraum (mindestens mehrere Schlupfzyklen, gewöhnlich 1 min bis 3 min) erfasst werden und der Durchschnitt dieser Werte ist für die Bewertung zu verwenden.
- Pumpenaggregate, die mit einem PDS ausgestattet sind, müssen mit einem abgeschirmten Kabel zwischen CDM und Motor mit einer maximalen Länge von 10 m gemessen werden.
- Die Messungen sind vorzunehmen, wenn das PDS wärmebeständig ist (Der Temperaturgradient muss maximal bei 2 K je Stunde liegen).

5.1.3 Messinstrumente

Für die in 5.1.1 beschriebenen Prüfverfahren sind Messinstrumente erforderlich, zur Bestimmung

- des Förderstroms Q ;
- der Energiehöhe der Pumpe H ;
- der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 .

Da die Genauigkeit der Messgeräte im Allgemeinen als Prozent des vollen Skalenendwerts angegeben wird, muss der Bereich der gewählten Messinstrumente so klein wie praktisch möglich sein.

Bei analogen Messgeräten sollten die beobachteten Werte im oberen Drittel des Messbereichs liegen.

Die zur Bestimmung des Förderstroms Q und der Energiehöhe der Pumpe H benötigte Messinstrumente-Ausrüstung muss in Übereinstimmung mit EN ISO 9906 ausgewählt werden. Ausführliche Informationen sind in EN ISO 9906:2012, A.1 gegeben.

Zur Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 in Fall 1 von 5.2.1 (direkt aus dem Stromnetz gespeister Motor) wird die elektrische Leistungsaufnahme P_1 anhand der Eingangsspannungen U und des Eingangsstroms bestimmt. Alle Anforderungen, die die Instrumente zur Messung von P_1 betreffen, müssen nach EN 60034-2-1 erfüllt sein.

Zur Bestimmung der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 in Fall 2 von 5.2.1 (Motor kombiniert mit und gespeist von CDM) wird die elektrische Leistungsaufnahme P_1 entsprechend des „Eingang/Ausgang-Messverfahrens“ in FprEN 61800-9-2 bestimmt. Alle Anforderungen, die die Instrumente zur Messung von P_1 betreffen, müssen nach EN 61800-9-2 erfüllt sein.

5.2 Berechnung der Lastpunkte

5.2.1 Allgemeines

Wie in FprEN 17038-1:2016, Abschnitt 4 erläutert beruht der Wert des Energieeffizienzindex (EEI-Wert) auf der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 des Pumpenaggregats, wenn die Pumpe zu den hydraulischen Lastpunkten betrieben wird, die in FprEN 17038-1:2016, 4.2 festgelegt sind. Ziel der Prüfungen ist es, die elektrische Leistungsaufnahme P_1 des Pumpenaggregats zu den N Werten des Förderstroms der Pumpe Q zu bestimmen, der vom Bezugs-Durchflusszeit-Profil festgelegt ist.

Es sind für die Prüfverfahren verschiedene Fälle zu unterscheiden:

- 1) Fall 1 Betrieb mit fester Drehzahl: Der Elektromotor des Pumpenaggregats wird mit einer konstanten Statorfrequenz, entweder Frequenz des Stromnetzes oder andere Frequenz aus einem CDM, gespeist und kann daher nur bei (nahezu) konstanter Drehzahl n betrieben werden. In diesem Fall kann während der Prüfung ausschließlich der Förderstrom der Pumpe Q gesteuert werden. Der Förderstrom Q ist an die verschiedenen Werte des Bezugs-Durchflusszeit-Profiles anzupassen, während die von der Pumpe erzeugte Energiehöhe H von der Q - H -Kennlinie der Pumpe bei konstanter Frequenz des Stators gegeben ist. Zusätzlich zur elektrischen Leistungsaufnahme P_1 müssen die tatsächlichen Werte des Förderstroms Q und der Energiehöhe H der Pumpe gemessen und dokumentiert werden.
- 2) Fall 2 Betrieb mit variabler Drehzahl: Das Pumpenaggregat muss mit variabler Drehzahl entlang einer Druck-Regelkennlinie betrieben werden. In der Prüfung ist der Förderstrom Q an die verschiedenen Werte des Bezugs-Durchflusszeit-Profiles anzupassen. Die Energiehöhe der Pumpe H ist entsprechend der Referenz-Druckkennlinie an die Werte anzupassen.

Für jeden Lastpunkt darf der angepasste und gemessene Förderstrom Q nicht von den Werten nach dem Bezugs-Durchflusszeit-Profil um mehr als $\pm 2 \%$ (bzw. $\pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, je nachdem welcher der größte absolute Wert ist) abweichen.

Der gemessene Wert H_{measured} darf nicht mehr als $\pm 5 \%$ (bzw. $\pm 0,2 \text{ m}$ Energiehöhe, je nachdem welcher der größte absolute Wert ist) von den Werten H_i entsprechend der Referenz-Druckkennlinie abweichen.

Bei mehrstufigen Pumpenaggregattypen, die mit unterschiedlicher Anzahl an Stufen angeboten und verkauft werden, sind die Prüfungen der Prüfpumpenaggregaten, die (hinsichtlich des Energieeffizienzindex) für die Typenreihe repräsentativ sein sollten, an Pumpenversionen mit der tatsächlichen Anzahl an Stufen für vertikale und horizontale Mehrstufenpumpen auszuführen.

Die Messung hat am tatsächlichen Laufraddurchmesser der Pumpe zu erfolgen.

5.2.2 Bestimmung von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$

In einem ersten Schritt des Prüfverfahrens ist $Q_{100\%}$ zu bestimmen. Zu diesem Zweck ist das Pumpenaggregat auf Höchstleistungsbetrieb zu schalten.

Die Höchstleistung eines Pumpenaggregats, das bei fester Drehzahl betrieben wird, wird erreicht, indem der Motor mit einer konstanten Statorfrequenz gespeist wird; dies kann entweder die Frequenz des Stromnetzes sein oder eine andere Frequenz aus einem CDM, die das Pumpenaggregat auf die höchste hydraulische Leistung bringt.

Die Höchstleistung eines Pumpenaggregats, das bei variabler Drehzahl betrieben wird, wird erreicht, indem die Regeleinrichtung die Drehzahl des tatsächlichen Pumpenaggregats an Werte anpassen kann, die eine Kennlinie mit maximaler hydraulischer Leistung ableiten.

ANMERKUNG Wo die H - Q -Kennlinie der Pumpe abgetrennt wird, um eine Überlast des Motors zu vermeiden, könnte der Punkt $Q_{100\%}$ am maximalen Förderstrom (Q_{max}) des Pumpenaggregats (rechtes Ende der Kennlinie) angesetzt werden, dann gilt: $Q_{100\%} = Q_{\text{max}}$.

Der Punkt des besten Wirkungsgrads ($Q_{100\%}/H_{100\%}$) liegt dann auf dieser Kennlinie des Pumpenaggregats.

Der Punkt ($Q_{100\%}/H_{100\%}$) definiert den Förderstrom entsprechend der Durchflusszeit-Profile und der Referenz-Druckkennlinie.

Die Zielwerte des Förderstroms Q sind zu bestimmen. Im Falle variabler Strömung ist zudem $H_{100\%}$ erforderlich, damit es möglich ist, die Punkte der Energiehöhe entlang der Referenz-Druckkennlinie zu finden. Im Falle einer konstanten Strömung werden die Werte der Energiehöhe anhand der Energiehöhe-Strömung-Kennlinie des Pumpenaggregats bestimmt.

Zur Bestimmung der erforderlichen H - Q -Punkte des Durchflusszeit-Profils und der Referenz-Druckkennlinie müssen die Werte von Förderstrom Q , Energiehöhe der Pumpe H und elektrischer Leistungsaufnahme P_1 bei Höchstleistungsbetrieb für eine ausreichende Anzahl an Betriebspunkten um den erwarteten Wert von $Q_{\text{BEP,unit}}$ herum gemessen werden.

Für die Auswahl dieser Betriebspunkte kann der Wert $Q_{\text{BEP,PU}}$ bei $n = n_{\text{N,PU}}$, der in der Dokumentation des Pumpenherstellers angegeben ist, als vorläufiger Schätzwert für den erwarteten Wert von $Q_{100\%}$ verwendet werden. Es ist wichtig, Messdaten in einem ausreichend großen Bereich von Q über- und unterhalb des erwarteten Werts von $Q_{100\%}$ zu erfassen (Empfohlen $0,7 \cdot Q_{100\%} < Q < 1,3 \cdot Q_{100\%}$).

Wenn der anhand der Prüfpunkte berechnete Wert von $Q_{100\%}$ zeigt, dass weniger als 3 Prüfpunkte Werte von Q haben, die größer als dieser berechnete Wert sind, müssen zusätzliche Prüfpunkte aufgenommen werden, damit mindestens 3 Prüfpunkte Werte von Q größer als $Q_{100\%}$ haben.

Der Wert von $H_{100\%}$ durch Einfügen von $Q = Q_{100\%}$ in Gleichung (7) berechnet werden.

5.2.3 Bestimmung der Teillast- und Überlastpunkte sowie der Referenz-Regelkennlinie

Die Bezugsströmungspunkte des Förderstroms Q_i sind mit der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$Q_i = \left(\frac{Q}{100} \right)_i \cdot Q_{100\%} \quad (2)$$

Dabei werden die Werte Q , die den N Lastpunkten des Bezugs-Lastfluss-Profiles entsprechen, Tabelle 2 oder Tabelle 3 entnommen.

Zur Bestimmung des Punktes $Q_{110\%}$ für den Fall, wenn die H-Q-Kennlinie der Pumpe abgetrennt wird, um eine Überlast des Motors zu vermeiden, und wenn der Punkt $Q_{100\%}$ am maximalen Förderstrom ($Q_{\max}$) des Pumpenaggregats (rechtes Ende der Kennlinie) angesetzt werden könnte, kann der Motor in der Prüfung für kurze Zeit überlastet werden und ($Q_{110\%}$, $H_{110\%}$) gemessen oder Gleichung (7) und (8) verwendet werden.

Bei Betrieb mit variabler Strömung sind Bezugspunkte der Energiehöhe H_i mit der folgenden Gleichung zu berechnen:

$$H_i = \left(\frac{H}{100} \right)_i \cdot H_{100\%} \quad (3)$$

Dabei werden die Werte H , die den N Lastpunkten auf der Referenz-Druckkennlinie entsprechen, Tabelle 5 entnommen.

Im Betrieb mit konstanter Strömung werden die Punkte der Energiehöhe H von der Pumpenkennlinie bestimmt, die bei der Ermittlung von $Q_{100\%}$, $H_{100\%}$ gilt.

Bei Pumpenaggregaten mit variabler Drehzahl und konstanter Strömung erfolgt die Prüfung bei fester Drehzahl mit Energiehöhe-Punkten entlang der Q-H-Kennlinie mit fest stehender Nenndrehzahl. Bei fester Drehzahl und variabler Strömung kann die Energiehöhe nicht an die Referenz-Druckkennlinie angepasst werden und folgt der Q-H-Kennlinie des Pumpenaggregats.

5.3 Berechnung von $P_{1,avg}$

5.3.1 Allgemeines

Die Werte Q_i , H_i und $P_{1,i}$ werden zu jedem Bezugs-Teillast/Überlastpunkt gemessen.

5.3.2 Mit dem Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit konstanter Strömung bewertete Pumpenaggregate

Auf Grundlage der Messwerte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 an den drei Lastpunkten (siehe Bild 1)

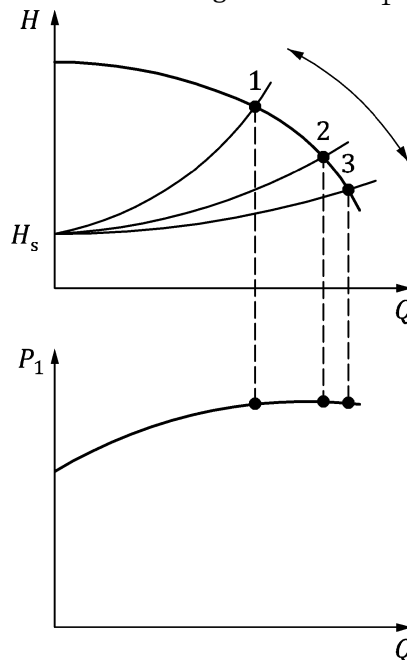


Bild 1 — Lastpunkte für Systeme mit konstanter Strömung – M1 und M3 (alle Pumpenaggregate)

wird das gewichtete Mittel der elektrischen Leistungsaufnahme $P_{1,avg,c}$ mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$P_{1,avg,c} = \sum_{i=1}^{i=3} \left[\left(\frac{\Delta t}{100} \right)_i \cdot P_{1,i} \right] \quad (4)$$

5.3.3 Mit dem Bezugs-Durchflusszeit-Profil für den Betrieb mit variabler Strömung bewertete Pumpenaggregate

Bild 2 zeigt die Messwerte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 an den vier Lastpunkten (siehe Bild 2) für den Betrieb mit variabler Strömung:

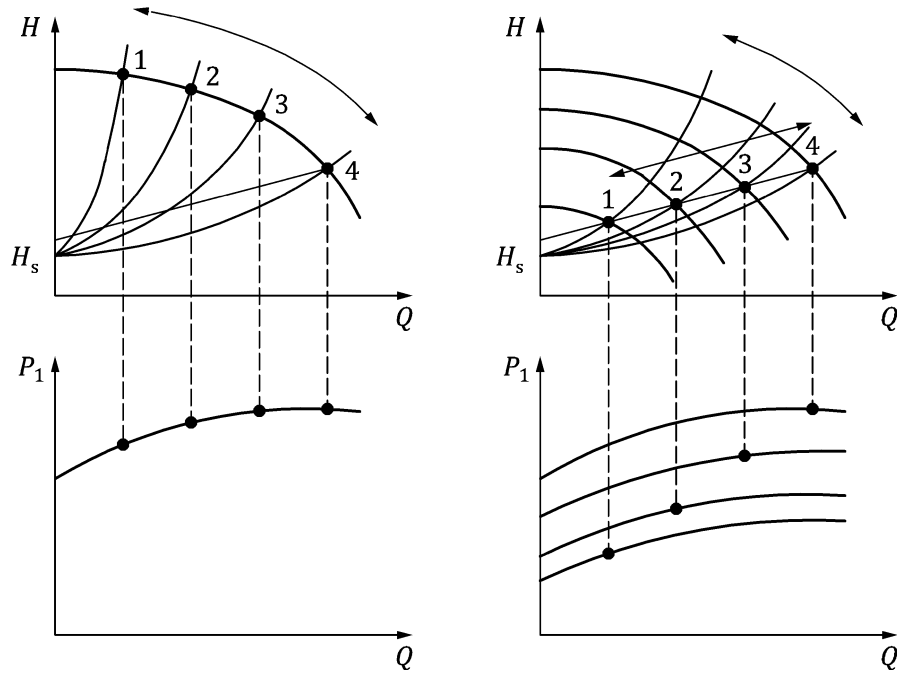


Bild 2 — Lastpunkte für den Betrieb mit variabler Strömung - M2, M4 und M5 (Pumpenaggregate mit fester und variabler Drehzahl)

Die Schritte zur Berechnung von $P_{1,av,v}$ für Pumpenaggregate mit variabler Drehzahl sind wie folgt:

3. Für jeden Wert des angepassten und gemessenen Förderstrom Q wird die gemessene Energiehöhe der Pumpe H_{measured} mit dem Zielwert H_i am entsprechenden Lastpunkt der Referenz-Druckkennlinie aus Gleichung (3) verglichen.
4. Die gemessene elektrische Leistung $P_{1,\text{measured}}$ bei Förderstrom Q_i und gegebener Energiehöhe von H_i muss (außer in Betriebsart M2) mit der folgenden Gleichung korrigiert werden:

$$P_{1,\text{corr}} = \left(\frac{H_i}{H_{\text{measured}}} \right) \cdot P_{1,\text{measured}} \quad (5)$$

Bei Pumpeneinheiten mit fester Drehzahl und Bedarf variabler Strömung (Betriebsart M2) ist $P_{1,\text{corr}}$ gleich $P_{1,\text{measured}}$ und keine Korrekturen werden angewendet.

Dann wird die korrigierte elektrische Leistung $P_{1,\text{corr}}$ bei diesem Förderstrom Q für die Berechnung des gewichteten Mittels der elektrischen Leistung $P_{1,\text{av}}$ hinzugezogen.

5. Das gewichtete Mittel der elektrischen Leistungsaufnahme $P_{1,av,v}$ wird mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$P_{1,av,v} = \sum_{i=1}^{i=4} \left[\left(\frac{\Delta t}{100} \right)_i \cdot P_{1,\text{corr},i} \right] \quad (6)$$

5.3.4 Verfahren zur Prüfung und Bewertung von Pumpenaggregaten mit besonderen Pumpentypen

5.3.4.1 Allgemeines

Für besondere, im Anwendungsbereich dieser Norm liegenden, Pumpentypen ist jeweils die Prüfung und Bewertung nach 5.3.4.2 bis 5.3.4.3 anzuwenden.

5.3.4.2 Pumpenaggregate mit doppelter Umwälzpumpe (ESCCi mit zwei Laufrädern)

Pumpenaggregate mit doppelter Umwälzpumpe sind zu bewerten, indem ein Antrieb/Laufrad in ein geeignetes Gehäuse einer Pumpe mit einem Pumpenkopf des Typs ESOB, ESCC oder ESCCi eingebaut wird.

Für die Berechnung des Bezugs-Pumpenwirkungsgrads $\eta_{\text{ref,PU}}$ muss der C-Wert aus Tabelle 4 für den jeweiligen Pumpentyp und die jeweilige Drehzahl verwendet werden.

5.3.4.3 Pumpenaggregate mit Pumpen nach mehr als einer Typdefinition

Bei Pumpenaggregaten mit Pumpentypen, auf die mehr als eine Typdefinition zutrifft, muss der Typ des Pumpengehäuses festlegen, welcher C-Wert aus Tabelle 4 zu entnehmen ist.

6 Bestimmung des Energieeffizienzindex von Pumpenaggregaten anhand des semi-analytischen Modells

6.1 Allgemeines

Anstatt den Energieeffizienzindex (EEL_V oder EEL_C , später EEI-Wert genannt) mittels Prüfungen an vollständigen Pumpenaggregaten zu bestimmen, kann dessen EEI-Wert mit mathematischen Verrechnungen auf Grundlage eines so genannten semi-analytischen Modells des Pumpenaggregats ermittelt werden.

Das mathematische Modell des vollständigen Geräts besteht aus Teilmodellen der Pumpe und der elektrischen Bauteile. Das vollständige Modell berücksichtigt die physikalischen Interaktionen der Bauteile. Zur Berechnung der EEI-Werte dürfen diese Modelle in Teilen oder im Ganzen verwendet werden. Alternativ sind mathematische Modelle zulässig, die mindesten die gleiche Genauigkeit der EEI-Werte liefern.

ANMERKUNG Beispielsweise sind alternative mathematische Modelle dann zulässig, wenn die Technologie der Bauteile nicht in dieser Norm behandelt wird oder andere mathematische (Teil-)Modelle verfügbar sind.

In dieser Norm wird ein Modell als semi-analytisches Modell bezeichnet, wenn die mathematischen Korrelationen (= Gleichungen) die Leistung in grundsätzlicher Form beschreiben, die die zugrunde liegenden physikalischen Prozesse und Einflüsse wiedergibt, aber eine begrenzte Anzahl an Daten (an so genannten *Stützpunkten*) benötigt, die sich aus Prüfungen an separaten Bauteilen ergeben. Diese Daten dienen der „Kalibrierung“ der grundlegenden Gleichungen. In diesem Sinn ist das für Pumpen verwendete Modell semi-analytisch. Andererseits handelt es sich bei dem Modell, das die Verluste eines PDS (oder des Elektromotors und des CDM, aus dem es besteht) beschreibt, ausschließlich um mathematische Gleichungen, die das Ziel haben, Verluste in einem bestimmten Bereich von Lastpunkten anhand bekannter Werte dieser Verluste an einer begrenzten Anzahl von (in dieser Norm spezifizierten) *Stützpunkten* zu interpolieren oder zu extrapolieren.

Die Modelle beschreiben die Relation zwischen physikalischen Eingangs- und Ausgangsgrößen (= Leistungsvariablen) der Bauteile sowie des gesamten Geräts anhand mathematischer Gleichungen. Diese sind z. B. die Abhängigkeit der Energiehöhe der Pumpe H vom Förderstrom Q und der Drehzahl n oder die Abhängigkeit der Leistungsverluste $P_{V,PDS}$ eines Antriebssystems (PDS) vom Wellendrehmoment T und der Drehzahl n .

Während die Prüfergebnisse aus der Bestimmung des EEI-Werts eines einzelnen Prüfpumpenaggregats im Allgemeinen eine (Gesamt-)Messunsicherheit aufweisen, ist die Genauigkeit eines Werts (beispielsweise des EEI-Werts), der mathematisch mithilfe der Modelle ermittelt wurde, von der Größe der Modellunsicherheiten abhängig.

Modellunsicherheiten sind die maximal möglichen Abweichungen (mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 %) der berechneten Werte der Ausgangsvariablen des Modells von den korrekten Werten der Ausgangsvariablen der tatsächlichen Bauteile für die gleichen Werte der Eingangsvariablen. Ihre Größe hängt von Voraussetzungen, Näherungen und Vereinfachungen ab, die Qualität und Korrektheit der Modelle festlegen.

Die Größe der Unsicherheiten jener Modelle, die dazu dienen können, den EEI-Wert eines einzelnen Pumpenaggregats oder den mittleren EEI-Wert einer Typengröße von Pumpenaggregaten zu bestimmen oder die in dieser Norm beschrieben sind, sind in Anhang D aufgeführt.

Das in diesem Abschnitt beschriebene Verfahren gilt für Pumpenaggregate,

- die aus Bauteilen (Pumpe und Motorsystem) bestehen, von denen die spezifischen Leistungsmerkmale im relevanten Bereich der Lastpunkte – zumindest eine geringe Anzahl an Betriebspunkten (siehe Anhang B) – bekannt sind, einschließlich möglicher Auswirkungen der Interaktion zwischen Bauteilen (z. B. zusätzliche Verluste von CDM gespeisten Elektromotoren),
- die den Betriebspunkt auf einen maximalen Wirkungsgrad des Geräts η_{unit} und die entsprechenden Werte von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$ (entsprechend ihrer Definition in Abschnitt 4) bei konstanter Statorfrequenz einstellen können.

6.2 Das semi-analytische Modell der Pumpe

Das semi-analytische Modell, das zur Beschreibung der Pumpenleistung erforderlich ist, besteht aus den 3 mathematischen Funktionen $H/H_{\text{BEP},N} = f(Q/Q_{\text{BEP},N}, n/n_{N,\text{PU}})$, $T/T_{\text{BEP},N} = f(Q/Q_{\text{BEP},N}, n/n_{N,\text{PU}})$ und $P/P_{\text{BEP},N} = f(Q/Q_{\text{BEP},N}, n/n_{N,\text{PU}})$, siehe Gleichungen (10) und (11).

$Q_{\text{BEP},N}$, $H_{\text{BEP},N}$, $T_{\text{BEP},N}$ und $P_{\text{BEP},N}$ sind jeweils der Förderstrom, die Energiehöhe der Pumpe, das Wellendrehmoment und die Wellenleistung am Punkt des besten Wirkungsgrads (BEP) der Pumpe bei Nenndrehzahl $n_{N,\text{PU}}$.

Im Modell wird die dimensionslose Kenngröße $H/H_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ bei $n = n_{N,\text{PU}}$ mit einem Polynom dritten Grades angenähert:

$$\frac{H}{H_{\text{BEP}}} = a_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^3 + b_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^2 + c_H \cdot \frac{Q}{Q_{\text{BEP}}} + d_H \quad (7)$$

Auch die dimensionslose Kenngröße $P/P_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ bei $n = n_{N,\text{PU}}$ wird mit einem Polynom dritten Grades angenähert:

$$\frac{P}{P_{\text{BEP}}} = a_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^3 + b_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^2 + c_P \cdot \frac{Q}{Q_{\text{BEP}}} + d_P \quad (8)$$

In den Gleichungen (7) und (8) sind a_H bis d_H die Polynomkoeffizienten für die dimensionslose Q - H -Kenngröße und a_P bis d_P die Polynomkoeffizienten für die dimensionslose Q - P -Kenngröße

Die Koeffizienten sind mathematisch derart zu bestimmen, dass die Gleichungen (7) und (8) *Ausgleichsfunktionen* für eine Anzahl k an Betriebspunkten sind, die sich jeweils auf den mittleren dimensionslosen Kenngrößen $H/H_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ und $P/P_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ der Pumpe befinden, wobei $n = n_{\text{N,PU}}$. Diese Punkte dienen als *Stützpunkte* für die Kalibrierung des Pumpenmodells. Die Gleichungen (7) und (8) haben die Bedingung „der kleinsten Quadrate“ zu erfüllen.

Die tatsächlichen Werte der Stützpunkte ergeben sich aus Prüfungen und Bewertungen an der jeweiligen Pumpengröße und müssen die Mittelwerte der Größe repräsentieren. Im Allgemeinen gilt für die Auswahl einer angemessenen Anzahl k an Stützpunkten für die Bestimmung der Ausgleichsfunktionen:

- Die Anzahl der stützenden Betriebspunkte sollte mindestens $k = 5$ sein;
- die stützenden Betriebspunkte müssen mindestens den Bereich der zugehörigen Förderstroms $0,1 \leq (Q/Q_{\text{BEP}}) \leq 1,1$, abdecken.

ANMERKUNG Für das Verständnis ist es wichtig, dass die hieraus entnommenen mittleren Kenngrößen der Pumpengröße und der stützenden Betriebspunkte die mittleren Leistungsgrößen x (d. h. Q , H , P und T) der Pumpengröße nur innerhalb der Bandbreite $x_{\text{mean}} \pm t_{x,\text{tot}}$ beschreiben. Diese Toleranzen $t_{x,\text{tot}}$ der Leistungsgrößen und -merkmale sind Resultat der fertigungsbedingten Leistungstoleranzen $t_{x,\text{man}}$ sowie der Messunsicherheiten e_x . Verfahren zur Bestimmung der Mittelwerte und der Gesamttoleranzen sind in EN 16480 erläutert.

Ein Verfahren zur Bestimmung der Polynomfunktionen $H/H_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ und $P/P_{\text{BEP}} = f(Q/Q_{\text{BEP}})$ der Pumpe anhand von nur 3 stützenden Betriebspunkten, die aus der Bestimmung des MEI-Werts der Pumpe nach EN 16480 hervorgehen, zusammen mit 2 weiteren Stützpunkten, die aus empirischen Korrelationen entstammen, ist in Anhang B beschrieben.

Bei $n = n_{\text{N,PU}}$ gilt eine Polynomfunktion mit den gleichen Polynomkoeffizienten a_p bis d_p für das entsprechende Drehmoment T/T_{BEP} .

$$\frac{T}{T_{\text{BEP}}} = a_p \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^3 + b_p \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP}}}\right)^2 + c_p \cdot \frac{Q}{Q_{\text{BEP}}} + d_p \quad (9)$$

Für Betriebs-(= Last-)Punkte entsprechend der in FprEN 17038-1:2016, Abschnitt 4 festgelegten Bezugs-Lastfluss-Profil und der Referenz-Regelkennlinien des Drucks liegt der Bereich der Drehzahlschwankung in der Regel bei $0,7 \leq n/n_{\text{N,PU}} < 1,05$.

Innerhalb dieses Bereich der relativen Drehzahl $n/n_{\text{N,PU}}$, können die relativen Kenngrößen der variablen Drehzahl $n/n_{\text{N,PU}}$ auf Grundlage des hydrodynamischen Ähnlichkeitsprinzip geschrieben werden:

$$\frac{H}{H_{\text{BEP,N}}} = a_H \cdot \frac{\left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right)^3}{\left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right)} + b_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right)^2 + c_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right) \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right) + d_H \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right)^2 \quad (10)$$

$$\frac{T}{T_{\text{BEP,N}}} = k_{\text{corr}} \cdot \left[a_p \cdot \frac{\left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right)^3}{\left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right)} + b_p \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right)^2 + c_p \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP,N}}}\right) \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right) + d_p \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{N,PU}}}\right)^2 \right] \quad (11)$$

$$\frac{P}{P_{\text{BEP},N}} = k_{\text{corr}} \cdot \left[a_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right)^3 + b_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right)^2 \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right) + c_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right) \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^2 + d_P \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^3 \right] \quad (12)$$

In Abhängigkeit vom Durchmesser des Laufrads D_{imp} und der Drehzahl n der Pumpe kann eine Korrektur am entsprechenden Wellendrehmoment $T/T_{\text{BEP},N}$ und der entsprechenden Wellenleistung $P/P_{\text{BEP},N}$ bei $n/n_{N,PU} < 1$ notwendig sein. Diese Korrektur berücksichtigt leichte Abweichungen von der hydrodynamischen Ähnlichkeit, wenn die Drehzahl vom Nennwert verringert ist. Im maßgebenden Bereich kann der folgende annähernde Korrekturwert k_{corr} eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} D_{\text{imp}}^2 \cdot \frac{n}{60} \geq 1 &\Rightarrow k_{\text{corr}} = 1 \\ D_{\text{imp}}^2 \cdot \frac{n}{60} < 1 &\Rightarrow k_{\text{corr}} = \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^{-0,15} \end{aligned} \quad (13)$$

Gleichung (13) verwendet D_{imp} in [m] und n in [min^{-1}]

Nahe der oberen Grenze des Bereichs der spezifischen Drehzahl n_s der Pumpen, die im Anwendungsbereich dieser Norm festgelegt sind, kann der Außendurchmesser der Laufradschaufeln entlang der Schaufelaustrittskante variieren. In diesen Fällen muss in Gleichung (13) der kleinste Außendurchmesser des Laufrads, der gewöhnlich der Durchmesser an der Rückenschaufel $D_{\text{imp,back}}$ ist, als Laufraddurchmesser D_{imp} verwendet werden.

6.3 Pumpenaggregate im Betrieb mit fester Drehzahl

6.3.1 Allgemeines

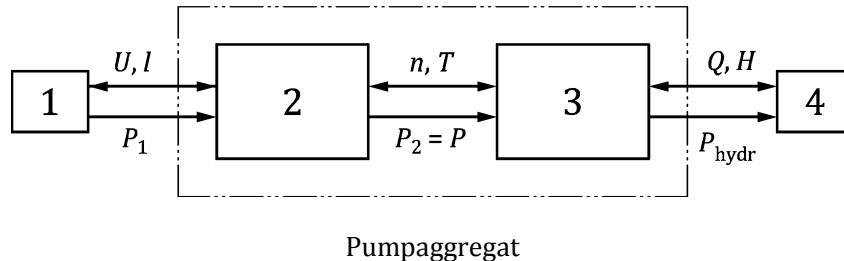
Das in diesem Unterabschnitt erläuterte Verfahren gilt für Pumpenaggregate mit einem *asynchronen* Elektromotor des Typs Käfigläufer-Induktion. Für diesen Motortypen ist die Drehzahl n etwas kleiner als die synchrone Drehzahl n_{sync} , die der Stromnetzfrequenz entspricht. Die Differenz zwischen synchroner Drehzahl und tatsächlicher Drehzahl n (die als so genannter Schlupf s in Prozent der synchronen Drehzahl beschrieben ist) hängt von dem Typ und der Größe des Motors und zudem von der Motorlast ab. Das Verfahren berücksichtigt die kleinen Schwankungen der Drehzahl des Pumpenaggregats bei wechselnder Wellenleistung und wechselndem Wellendrehmoment der Pumpe.

In Bild 3 ist die Struktur des Modells dargestellt. Die elektrische Leistungsaufnahme P_1 aus dem Stromnetz wird vom Elektromotor in die mechanische Ausgangsleistung des Motors P_2 umgewandelt. Die mechanische Ausgangsleistung des Motors P_2 wird über mechanische Kupplung an die Leistungsaufnahme der Pumpe P übertragen, die diese mechanische Leistungsaufnahme (= Welle) P in hydraulische Leistung P_{hyd} umwandelt. Die hydraulische Leistung P_{hyd} wird an das Fluid im Hydraulikkreis übertragen.

In Bild 3 stellen die einseitigen Richtungspfeile die Kraftübertragung dar, wohingegen die zweiseitigen Richtungspfeile die physikalischen Interaktionen mit den entsprechenden physikalischen Größen darstellen.

Das Stromnetz und der Elektromotor interagieren über die elektrischen Größen von Spannung U und Strom I . Die interne Interaktion der Bauteile Elektromotor und Pumpe erfolgt über die mechanischen Größen Drehzahl n und Drehmoment T . Die Pumpen interagieren mit dem Hydraulikkreis über den Förderstrom der hydraulischen Größen Q und der Energiehöhe der Pumpe H .

Der Bedarf von Förderstrom Q und Energiehöhe H bestimmt den entsprechenden mechanischen Leistungsbedarf der Pumpe P , zu dem neben der hydraulischen Leistung P_{hyd} die internen Leistungsverluste der Pumpe $P_{L,PU}$ zählen. Die elektrische Leistungsaufnahme P_1 deckt die Wellenleistung $P_2 = P$ und zudem die internen Leistungsverluste des Elektromotors $P_{L,M}$ ab.



Legende

- 1 Stromnetz
- 2 Elektromotor
- 3 Pumpe
- 4 Hydraulikkreis

Bild 3 — Modellstruktur für von Motoren mit fester Drehzahl angetriebene Pumpen

6.3.2 Das Modell des Elektromotors

Der Bereich des normalen Betriebs eines Motors mit fester Drehzahl liegt innerhalb des Bereichs von Kenngröße T - n , wo das Drehmoment nahezu linear von der Drehzahl abhängt. Die synchrone Drehzahl n_{sync} in $[\text{min}^{-1}]$ wird definiert als

$$n_{\text{sync}} = \frac{60 \cdot f_{\text{stator}}}{p} \quad (14)$$

Dabei ist f_{stator} die Statorfrequenz im Gerät [Hz] und p die Anzahl der Polpaare des Motors.

Die relative Abweichung der Drehzahl n von der synchronen Drehzahl n_{sync} wird definiert als Schlupf s

$$s = \frac{n_{\text{sync}} - n}{n_{\text{sync}}} = 1 - \frac{n}{n_{\text{sync}}} \quad (15)$$

Der mit Gleichung (15) berechnete Schlupf s ist eine Dezimalzahl im Intervall $0 \leq s \leq 1$.

ANMERKUNG Die synchrone Drehzahl eines 2-poligen Motors (mit $P = 1$) beträgt z. B. 3 000 1/min und die eines 4-poligen Motors (mit $P = 2$) beträgt 1 500 1/min.

Bei Nennleistung $P_{N,M}$ des Elektromotors unter Auslegungsbedingungen und bei entsprechender Nenndrehzahl $n_{N,M}$ des Elektromotors ist der Nenn-Schlupf

$$s_N = 1 - \frac{n_{N,M}}{n_{\text{sync}}} \quad (16)$$

Die Nennleistung $P_{N,M}$ des Elektromotors unter Auslegungsbedingungen und die entsprechende Nenndrehzahl $n_{N,M}$ des Elektromotors werden vom Hersteller des Motors auf dem Typenschild und in der technischen Dokumentation des Motors angegeben.

Der maßgebende lineare Teil der Kenngröße T - n des Elektromotors kann mathematisch mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\frac{T}{T_{N,M}} = \frac{1}{s_N} \cdot \left(1 - \frac{n}{n_{\text{sync}}}\right) \quad (17)$$

Das Nenndrehmoment $T_{N,M}$ des Motors im Gerät [Nm] kann mit folgender Gleichung aus der Wellenleistung $P_{N,M}$ im Gerät [kW] und der Nenndrehzahl $n_{N,M}$ im Gerät [1/min] berechnet werden:

$$T_{N,M}[\text{Nm}] = \frac{60[\text{s}] \cdot 1000[\text{W}]}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{P_{N,M}[\text{kW}]}{n_{N,M}[\text{1/min}]} \approx 9549 \cdot \frac{P_{N,M}[\text{kW}]}{n_{N,M}[\text{1/min}]} \quad (18)$$

Darüber hinaus enthält das Modell des Elektromotors eine mathematische Funktion $\eta_M = f(T/T_{N,M})$ für den Motorwirkungsgrad η_M .

EN 60034-30-1 (5.2) empfiehlt und die Verordnung (EU) Nr. 640/2009 der Kommission fordert, dass die Werte des Motorwirkungsgrads η_M bei 100 %, 75 % und 50 % der Nennleistung ($= P_{N,M}$) bestimmt und dokumentiert werden. Diese Werte werden als $\eta_{M,100\%}$, $\eta_{M,75\%}$ und $\eta_{M,50\%}$ hier festgelegt. Auf Grundlage dieser Werte kann ein Polynom zweiten Grades berechnet werden

$$\eta_M = a_\eta \cdot \left(\frac{P_2}{P_{N,M}}\right)^2 + b_\eta \cdot \frac{P_2}{P_{N,M}} + c_\eta \quad (19)$$

mit den Koeffizienten

$$a_\eta = 8 \cdot \eta_{M,100\%} - 16 \cdot \eta_{M,75\%,M} + 8 \cdot \eta_{M,50\%} \quad (20)$$

$$b_\eta = -10 \cdot \eta_{M,100\%} + 24 \cdot \eta_{M,75\%} - 14 \cdot \eta_{M,50\%} \quad (21)$$

$$c_\eta = 3 \cdot \eta_{M,100\%} - 8 \cdot \eta_{M,75\%} + 6 \cdot \eta_{M,50\%} \quad (22)$$

Gewöhnlich werden die Werte von $\eta_{M,100\%}$, $\eta_{M,75\%}$ und $\eta_{M,50\%}$ in [%] angegeben. Dementsprechend ist auch der nach Gleichung (19) berechnete Motorwirkungsgrad η_M in [%].

ANMERKUNG Gleichung (19) erfüllt nicht die (physikalisch erforderliche) Voraussetzung, dass $\eta_M = 0$ für $P_2 = 0$, aber sie nähert sich mit hinlänglicher Genauigkeit dem Motorwirkungsgrad innerhalb des maßgebenden Bereichs von $P_2/P_{N,M}$.

6.3.3 Interaktion von Pumpe und Motor

Die Drehzahl n , das Wellendrehmoment T und die Wellenleistung P_2 für jeden einzelnen Wert des Förderstroms Q können berechnet werden, indem das (absolute) Drehmoment der Pumpe T aus Gleichung (11) und das (absolute) Drehmoment des Motors T aus Gleichung (17) gleichgesetzt werden. Abweichungen der tatsächlichen Drehzahl n von der Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PJ}$ (verursacht vom Schlupf s) sind aufgrund des Betriebsbereichs des konstanten Bezugs-Durchflusszeit-Profiles des Pumpenaggregats gering. Daher kann der Korrekturwert k_{corr} in den Gleichungen (11) und (12) auf 1,0 gesetzt werden.

Die führt zur Gleichung:

$$d_P \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^3 + \left[c_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right) + \frac{1}{s_N} \cdot \frac{n_{N,PU}}{n_{sync}} \cdot \frac{T_{N,M}}{T_{BEP,N}} \right] \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^2 + \left[b_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^2 - \frac{1}{s_N} \cdot \frac{T_{N,M}}{T_{BEP,N}} \right] \cdot \frac{n}{n_{N,PU}} + a_P \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^3 = 0 \quad (23)$$

Diese ist eine kubische Gleichung für die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ (entsprechend dem relativen Förderstrom $Q/Q_{BEP,N}$), die arithmetisch gelöst werden kann, siehe Anhang E.

Für jeden Wert von $Q/Q_{BEP,N}$ kann anhand Gleichung(11) mit $k_{corr} = 1,0$ kann das entsprechende relative Drehmoment $T/T_{BEP,N}$ berechnet werden, wobei die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ aus der Lösung der Gleichung (23) hervorgeht. Das entsprechende relative Drehmoment in Bezug auf das Nenndrehmoment des Motors $T_{N,M}$ wird dann berechnet anhand

$$\frac{T}{T_{N,M}} = \frac{T_{BEP,N}}{T_{N,M}} \cdot \frac{T}{T_{BEP,N}} \quad (24)$$

und die entsprechende Wellenleistung P wird berechnet anhand

$$P_2 = P_{N,M} \cdot \frac{n_{N,PU}}{n_{N,M}} \cdot \frac{n}{n_{N,PU}} \cdot \frac{T}{T_{N,M}} \quad (25)$$

Für jeden Wert der relativen Wellenleistung $P_2/P_{N,M}$ wird der Motorwirkungsgrad η_M anhand Gleichung (19) berechnet und die elektrische Leistungsaufnahme P_1 wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$P_1 = 100 \cdot \frac{P_2 [W]}{\eta_M [\%]} \quad (26)$$

6.3.4 Bestimmung von $Q_{100\%}$ aus Q_{BEP}

Um den Wert von $Q_{100\%}$ zu bestimmen, wie er in Abschnitt 000 definiert ist, sind die Funktion $\eta_{unit} = f(Q)$ und ihre Höchstwerte wie folgt zu ermitteln:

1. Es wird die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ unter Verwendung der 5 Werte $Q/Q_{BEP,N} = 0,8, 0,9, 1,0, 1,1$ und $1,2$, die in Gleichung 6.19 eingefügt werden berechnet. Falls die Werte außerhalb des Betriebsbereichs des Pumpenaggregats liegen, sind andere Werte innerhalb des Betriebsbereichs zu wählen, die sich für Gleichung (25) eignen.
2. Durch Einfügen der Werte von $Q/Q_{BEP,N}$ und der entsprechenden Werte der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$ jeweils in die Gleichungen (10) und (11) werden die entsprechenden Werte der relativen Energiehöhe der Pumpe $H/H_{BEP,N}$ und des relativen Wellendrehmoments $T/T_{BEP,N}$ berechnet.
3. Nach der Beschreibung in 6.3.3 werden die entsprechenden Werte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 berechnet.
4. Die entsprechenden Werte des Gerätewirkungsgrads η_{unit} werden mit folgender Gleichung berechnet:

$$\eta_{unit} = \rho_w \cdot g \cdot \frac{Q_{BEP,N}}{3600} \cdot H_{BEP,N} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right) \cdot \left(\frac{H}{H_{BEP,N}} \right)}{P_1} \quad (27)$$

- In Gleichung (27) beträgt die Dichte von sauberem, kaltem Wasser ρ_W 1 000 kg/m³ und die Gravitationskonstante g ist 9,81 m/s². Als Einheiten sind [m³/h] für den Förderstrom $Q_{BEP,N}$, [m] für die Energiehöhe der Pumpe H und [W] für die elektrische Leistungsaufnahme P_1 zu verwenden. Der Wirkungsgrad des Geräts η_{unit} ergibt sich als Dezimalzahl aus der Gleichung (27). Durch Multiplikation dieser Zahl mit dem Faktor 100 wird der Wert von η_{unit} in [%] erhalten.
- Die Relation $\eta_{unit} = f(Q/Q_{BEP,N})$ wird mit einem Polynom dritten Grades als Ausgleichsfunktion auf Grundlage der 5 berechneten Paare von $Q/Q_{BEP,N}$ und η_{unit} angenähert:

$$\eta_{unit} = A_\eta \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^3 + B_\eta \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^2 + C_\eta \cdot \frac{Q}{Q_{BEP,N}} + D_\eta \quad (28)$$

- Der Wert von $Q_{100\%}/Q_{BEP,N} = Q_{BEP,unit}/Q_{BEP,N}$ wird ermittelt mit der Gleichung

$$\begin{aligned} \frac{Q_{100\%}}{Q_{BEP,N}} &= \frac{Q_{BEP,unit}}{Q_{BEP,N}} \\ &= -\frac{1}{3} \cdot \frac{B_\eta}{A_\eta} \pm \sqrt{\frac{1}{9} \cdot \left(\frac{B_\eta}{A_\eta} \right)^2 - \frac{1}{3} \cdot \frac{C_\eta}{A_\eta}} \end{aligned} \quad (29)$$

Von den 2 aus Gleichung (29) erhaltenen Werten von $Q_{BEP,unit}$ (wegen des doppelten Vorzeichens $\pm$ der Quadratwurzel) entspricht der Wert dem Höchstwert der Q - η_{unit} -Kennlinie, der näher bei 1,0 liegt.

6.3.5 Bestimmung des $P_{1,avg,c}$ -Werts

Die nach dem Bezugs-Lastfluss-Profil spezifizierten Werte des relativen Förderstroms $Q/Q_{100\%}$ werden für jeden spezifischen hydraulischen Lastpunkt angegeben.

Zur Bestimmung von $P_{1,avg,c}$ werden die folgenden Schritte ausgeführt:

- Die Werte des relativen Förderstroms $Q/Q_{BEP,N}$, die den durch das Bezugs-Lastfluss-Profil definierten Werten $Q/Q_{100\%}$ entsprechen (siehe Abschnitt 4), werden anhand der folgenden Umrechnungsformel berechnet:

$$\frac{Q}{Q_{BEP,N}} = \left(\frac{Q_{100\%}}{Q_{BEP,N}} \right) \cdot \frac{Q}{Q_{100\%}} \quad (30)$$

Dabei ergibt sich der Umrechnungsfaktor $Q_{100\%}/Q_{BEP,N}$ aus Gleichung (29).

- Die aus Gleichung (30) erhaltenen Werte von $Q/Q_{BEP,N}$ werden in Gleichung (23) eingefügt und die entsprechenden Werte der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$ werden ermittelt.
- Durch Einfügen der Werte von $Q/Q_{BEP,N}$ und der entsprechenden Werte von $n/n_{N,PU}$ in Gleichung (11) werden die entsprechenden Werte des relativen Wellendrehmoments $T/T_{BEP,N}$ berechnet.
- Nach der Beschreibung in 6.3.3 werden die entsprechenden Werte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 berechnet.
- Das gewichtete Mittel der elektrischen Leistung $P_{1,avg,v}$ wird mit Gleichung (10) berechnet.

Mithilfe dieses Werts $P_{1,avg,c}$ kann EEL_c oder EEL_v entsprechend der Abschnitte 7 und 8 bestimmt werden.

6.4 Pumpenaggregate mit einem Leistungsantriebssystem (PDS)

6.4.1 Allgemeines

In diesem Unterabschnitt wird ein Verfahren beschrieben, das zur Bestimmung des Energieeffizienzindex (EEI) von Pumpenaggregaten angewendet wird, die mit einem Leistungsantriebssystem (PDS) ausgestattet sind, die bei variabler Drehzahl betrieben werden. Ein vollständiges Antriebsmodul (CDM), das zum PDS gehört, sorgt dafür, dass der Förderstrom der Pumpe Q und die Energiehöhe der Pumpe H unabhängig voneinander schwanken. Daher können die hydraulischen Lastpunkte (= Paare aus Förderstrom Q und Energiehöhe der Pumpe H) genau (zumindest für das mathematische Modell des Pumpenaggregats) an die Werte der Referenz-Druckkennlinie, die in 4.3 von prEN 17038-1:2016 festgelegt sind, angepasst werden.

Im tatsächlichen Gerät besteht das PDS aus einem Elektromotor (in den meisten Fällen ein 3-Phasen-Asynchronmotor des Typs Käfigläufer-Induktion), einem CDM (das einen elektronischen Frequenzumformer und die Hardware/Software zur elektrischen Steuerung beinhaltet) sowie einiger Hilfsgeräte, wie Kabel, EMC- und Oberwellen-Filter.

ANMERKUNG Der Fall *synchroner* Elektromotoren, wie z. B. Dauermagnet-Synchronmotoren, werden in diesem Verfahren nicht direkt aufgegriffen, kann jedoch im Sonderfall abgedeckt werden, wenn der Schlupf auf Null gesetzt wird. Das Modell könnte auch dazu eingesetzt werden, EEI-Werte bei anderen Typen von Elektromotoren zu berechnen, falls die Verluste an den notwendigen Lastpunkten verfügbar sind.

Bei einem PDS kann es sich um ein Produkt handeln, das in der Verantwortung eines Herstellers gefertigt wird. Leistungsverluste an einigen stützenden mechanischen Lastpunkten (= Paare aus Drehmoment T und Drehzahl n) im PDS, die in FprEN 61800-9-2 festgelegt sind, müssen vom Hersteller in der technischen Dokumentation für den jeweiligen Typ und die jeweilige Größe des PDS angegeben werden. Ein Teil der stützenden Lastpunkte kann als Grundlage für ein Interpolations-/Extrapolationsverfahren dienen, um die Leistungsverluste im PDS an diesen mechanischen Lastpunkten die den hydraulischen Lastpunkten der Pumpe entsprechen, zu berechnen.

In anderen Fällen besteht das PDS aus Bauteilen (Motor, CDM, Hilfsgeräte), die von unterschiedlichen Herstellern gefertigt und geliefert wurden und in der Verantwortung eines Unternehmens, das das Pumpenaggregat auf den Markt bringt und/oder in Betrieb nimmt, mit einer Pumpe in ein vollständiges Pumpenaggregat zusammengesetzt werden. In diesen Fällen besteht das mathematische Modell des PDS aus der Kombination separater Modelle des Elektromotors, des CDM und der Hilfsgeräte. Die separaten Modelle beruhen auf Leistungsverlusten an stützenden Lastpunkten, die auch in FprEN 61800-9-2 festgelegt sind. Die stützenden Lastpunkte sind als mechanische Lastpunkte für den Motor und als elektrische Lastpunkte (= Paare aus Strom erzeugendem Drehmoment I und Frequenz des Stators f_M) für das CDM spezifiziert. Der Hersteller muss für jedes Bauteil die Leistungsverluste an genormten stützenden Lastpunkten angeben. Schwierigkeiten entstehen aus den Interaktionen zwischen dem Elektromotor und dem CDM, die dazu führen, dass die Leistung und Leistungsverluste des Bauteils von einzelnen Eigenschaften des „gepaarten Bauteils“ abhängen. Um diese Auswirkungen wenigstens in einer guten Annäherung zu berücksichtigen, werden die Werte an den genormten stützenden Lastpunkten für jedes Bauteil von dessen Hersteller angegeben, falls das Bauteil mit einem so genannten genormten gepaarten Bauteil kombiniert werden soll, d. h. ein Referenzmotor (RM) oder ein spezifisch bestimmter Prüfmotor (oder Prüflast), gepaart mit dem tatsächlichen CDM und einem Referenz-CDM (RCDM) oder einem spezifisch bestimmten Prüf-CDM als Teil des tatsächlichen Motors. Die Eigenschaften dieser gepaarten Referenzbauteile werden in FprEN 61800-9-2 festgelegt.

Das/Die Verfahren, wie die Leistungsverluste der verschiedenen Bauteile eines PDS an ihren genormten stützenden Lastpunkten mit den Leistungsverlusten des vollständigen PDS an dessen genormten stützenden Lastpunkten zu verbinden sind, werden ausführlich in FprEN 61800-9-2 beschrieben und informativ in Kürze in Anhang C zusammengefasst.

ANMERKUNG In FprEN 61800-9-2 ist zudem ein Referenz-PDS (RPDS) spezifiziert. Dessen Leistung steht für einen Zustand, der zumeist technisch erreicht werden kann. Falls genauere Informationen zur Leistung fehlen, insbesondere zu Werten, die für die Berechnung der Leistungsverluste eines einzelnen PDS als Teil eines Pumpenaggregats erforderlich sind, können Werte des RPDS, wie sie in FprEN 61800-9-2 festgelegt sind, für eine annähernde Bestimmung des EEI-Werts des Pumpenaggregats verwendet werden.

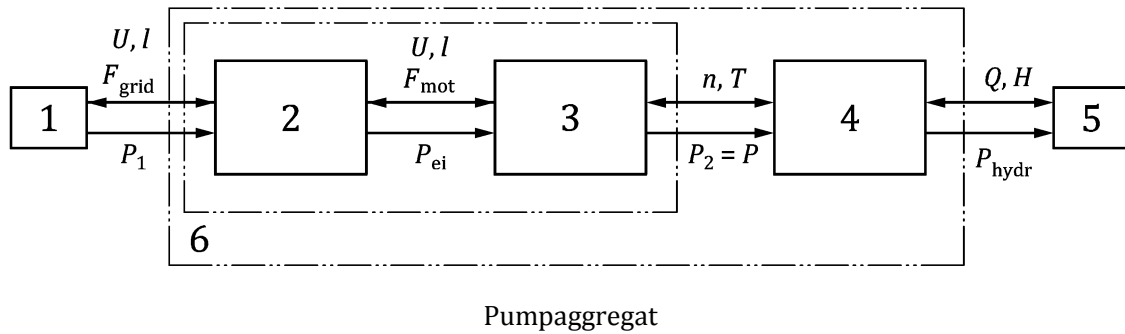
Es sollte beachtet werden, dass die für ein tatsächliches PDS angegebenen Verluste, geringer als die für das RPDS angegebenen Verluste sein können, weshalb der resultierende EEI-Wert des Pumpenaggregats niedriger (d.h. besser) als der EEI-Wert sein kann, der durch die mathematische Verwendung des entsprechenden RPDS ermittelt wurde.

In Bild 4 ist die Modellstruktur des vollständigen Pumpenaggregats dargestellt. Die elektrische Leistungsaufnahme P_1 aus dem Stromnetz wird vom Leistungsantriebssystem (PDS) in die mechanische Wellenleistung P_2 umgewandelt. Die Umwandlung erfolgt in zwei Schritten. Das vollständige Antriebsmodul (CDM) wandelt die elektrische Leistungsaufnahme P_1 aus dem Stromnetz mit dessen konstanter Frequenz f_{stator} in die elektrische Leistung P_{el} um, die an den Elektromotor mit variabler Frequenz des Stators f_M übertragen wird. Diese Frequenz des Stators f_M ist mit der Ausgangsfrequenz des Umformers $f_{\text{out,CDM}}$ identisch. Aus dem PDS wird die mechanische Leistung P_2 über mechanische Kupplung an die Pumpe übertragen, die die mechanische Wellenleistung P_2 in hydraulische Leistung P_{hyd} umwandelt. Die hydraulische Leistung P_{hyd} wird an das Fluid im Hydraulikkreis übertragen.

In Bild 4 stellen die einseitigen Richtungspfeile die Kraftübertragung dar, wohingegen die zweiseitigen Richtungspfeile die physikalischen Interaktionen mit den entsprechenden physikalischen Größen darstellen.

Das Stromnetz und das PDS interagieren über die elektrischen Größen Spannung U und Strom I . Die interne Interaktion der Bauteile CDM und Elektromotor erfolgt über die elektrischen Größen Spannung U , Strom I und Frequenz f_M . Die interne Interaktion der Bauteile Elektromotor und Pumpe erfolgt über die mechanischen Größen Drehzahl n und Drehmoment T . Die Pumpen interagieren mit dem Hydraulikkreis über den Förderstrom der hydraulischen Größen Q und der Energiehöhe der Pumpe H .

Der Bedarf von Förderstrom Q und Energiehöhe H bestimmt die entsprechende Wellenleistung P , zu der neben der hydraulischen Leistung P_{hyd} die internen Leistungsverluste der Pumpe $P_{L,\text{PU}}$ zählen. Die elektrische Leistungsaufnahme P_1 umfasst die Wellenleistung $P_2 = P$ sowie auch die internen Leistungsverluste des PDS $P_{L,\text{PDS}}$, die die Summe der Leistungsverluste im CDM $P_{L,\text{CDM}}$, im Elektromotor $P_{L,M}$ und in den Hilfsgeräten $P_{L,\text{aux}}$ sind.



Legende

- 1 Stromnetz
- 2 Vollständiges Antriebsmodul (CDM, en: Complete Drive Module)
- 3 Elektromotor
- 4 Pumpe
- 5 Hydraulikkreis
- 6 Leistungsantriebssystem

Bild 4 — Modellstruktur für von einem Leistungsantriebssystem (PDS) angetriebene Pumpen

6.4.2 Das Modell des Leistungsantriebssystems (PDS)

An dieser Stelle wird nur der Fall behandelt, in dem Werte von Leistungsverlusten an genormten stützenden Lastpunkten für das vollständige PDS entweder vom Hersteller des vollständigen PDS oder vom Hersteller des Elektromotors bzw. CDM angegeben sind. Für sonstige Fälle siehe Anhang C.

FprEN 61800-9-2 legt 8 stützende Lastpunkte in der gesamten Kenngröße $T/T_{N,M} = f(n/n_{N,M})$ fest. Der Wert der Nenndrehzahl des Elektromotors $n_{N,M}$ wird vom Hersteller des Motors auf dem Typenschild und in der technischen Dokumentation angegeben. Die Werte des Nenndrehmoments $T_{N,M}$ des PDS sind mit denen des Elektromotors identisch, der zum PDS gehört. Das Nenndrehmoment $T_{N,M}$ des Motors kann mit Gleichung (18) anhand der Nennwellenleistung $P_{N,M}$, die vom Motorhersteller auf dem Typenschild und in der technischen Dokumentation angegeben ist, und anhand der Nenndrehzahl $n_{N,M}$ berechnet werden.

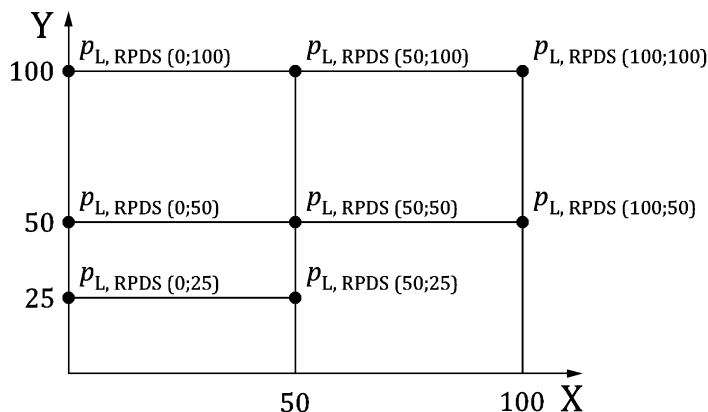
In FprEN 61800-9-2 sind die Nennwerte der Drehzahl und des Drehmoments des PDS jeweils mit den 100 %-Werten der Drehzahl und des Drehmoments des PDS identisch. Die (mechanischen) Lastpunkte werden als Paare aus der relativen Drehzahl $n/n_{100\% (M)} = n/n_{N,M}$ und dem relativen Drehmoment $T/T_{100\% (M)} = T/T_{N,M}$ beschrieben.

Für die in FprEN 61800-9-2 angegebenen stützenden mechanischen Lastpunkte müssen die relativen Leistungsverluste

$$p_{L,PDS(x;y)} = \frac{P_{L,PDS(x;y)}}{P_{N,M}} \quad (31)$$

vom verantwortlichen Unternehmen angegeben werden. Die Indizes in Klammern zeigen die relativen Werte $x = T/T_{N,M}$ und $y = n/n_{N,M}$ in [%].

In [Verweisung] werden alle Werte für das Referenz-PDS genannt, aber die relativen Leistungsverluste an den gleichen stützenden Lastpunkten, was das relative Drehmoment $T/T_{N,M}$ und die relative Drehzahl $n/n_{N,M}$ betrifft, muss für ein tatsächliches PDS angegeben werden.

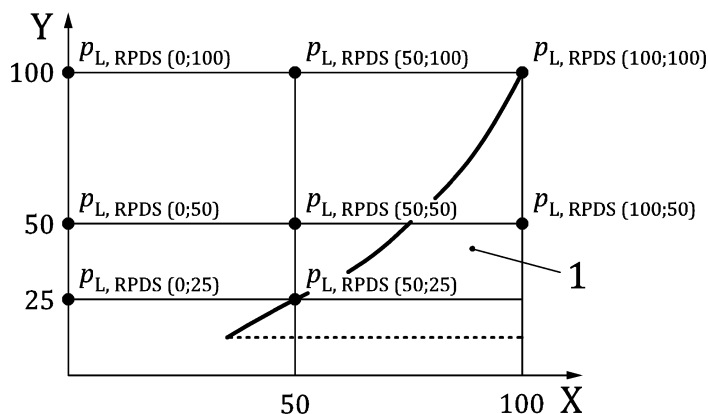


Legende

- Y Relatives Drehmoment des RPDS /%
- X Relative Drehzahl des RPDS /%
- In EN 50598-2 festgelegte 8 stützende Lastpunkte

Bild 5 — Stützende Lastpunkte eines PDS (aus EN 50598 2 entnommen)

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass die mechanischen Lastpunkte von Pumpenaggregaten, die den hydraulischen Lastpunkten nach den in Abschnitt 4 aufgeführten Referenz-Regelkennlinien des Drucks entsprechen, sich normalerweise nur in einem Teilbereich des gesamten Felds möglicher Lastpunkte eines PDS befinden. Dieser Bereich ist in Bild 6 mit roten Rahmenlinien gekennzeichnet.



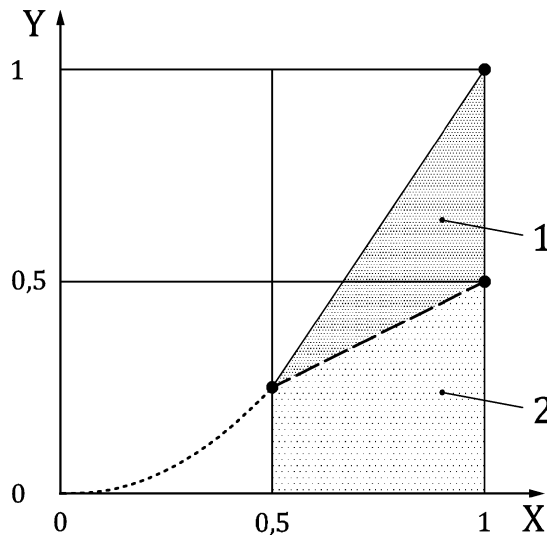
Legende

- Y Relatives Drehmoment des PDS /%
- X Relative Drehzahl des PDS /%
- 1 Lastpunktbereich für Pumpen als Arbeitsmaschinen
- In EN 50598-2 festgelegte 8 stützende Lastpunkte

Bild 6 — Bereich typischer Lastpunkte von Pumpenaggregaten

Innerhalb dieses Bereichs können die relativen Leistungsverluste eines PDS an den hydraulischen und mechanischen Lastpunkten entsprechend der in 4.3 von prEN 17038-1:2016 festgelegten Referenz-Druckkennlinie auf Grundlage von nur 3 stützenden Lastpunkten $p_{L,PDS} (100;100)$, $p_{L,PDS} (100;50)$ und $p_{L,PDS} (50;25)$, die sich an den Grenzen des für Pumpenaggregate relevanten Teilbereichs befinden, annähernd berechnet werden.

Aufgrund der relativ geringen und nahezu linearen Schwankung der relativen Verluste innerhalb eines für Pumpenaggregate relevanten Teilbereichs von Lastpunkten ist eine einfache Inter- bzw. Extrapolation innerhalb und außerhalb des Dreieck aus den 3 stützenden Lastpunkten, die als Ecken dienen (siehe [Verweisung]), ausreichend genau, um die relativen Verluste zu jedem unter 4 angegebenen Lastpunkt zu berechnen. Diese Gleichung zur Inter-/Extrapolation ist die einzige mathematische Gleichung des PDS-Modells, die erforderlich ist, um den EEI-Wert des gesamten Pumpenaggregats zu bestimmen und die für das tatsächliche PDS von den Leistungsverlusten an den 3 stützenden Lastpunkten kalibriert wird (siehe Bild 7).



Legende

- Y T/T 100% (M)
- X n/n 100% (M)
- 1 Interpolation der PDS-Verluste (auf einer Ebene über 3 stützende Lastpunkte)
- 2 Extrapolation der PDS-Verluste (Wert auf einer Ebene über 3 stützende Lastpunkte multipliziert mit der empirischen Korrektur k_{corr})
- 3 von 8 stützenden Lastpunkten nach EN 50598-2
- — — Grenzlinie zwischen Interpolations- und Extrapolationsbereich

Bild 7 — Interpolations- und Extrapolationsbereiche

Die Gleichung zur Inter-/Extrapolation lautet:

$$p_{L,PDS} = k_{\text{corr}} \cdot \left[B_n \cdot \left(\frac{n}{n_{N,M}} \right) + B_T \cdot \left(\frac{T}{T_{N,M}} \right) + C \right] \quad (32)$$

In Gleichung (32) werden alle Größen entweder als Dezimalwerte oder in [%] angegeben, je nachdem wie die Werte an den stützenden Lastpunkten angegeben sind.

Die 3 Konstanten in Gleichung (32) werden anhand der Werte der relativen Leistungsverluste an den 3 stützenden Lastpunkten mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$B_n = -p_{L,PDS(100;100)} + 3 \cdot p_{L,PDS(100;50)} - 2 \cdot p_{L,PDS(50;25)} \quad (33)$$

$$B_T = 2 \cdot (p_{L,PDS(100;100)} - p_{L,PDS(100;50)}) \quad (34)$$

$$C = -p_{L,PDS(100;50)} + 2 \cdot p_{L,PDS(50;25)} \quad (35)$$

Im maßgebenden Bereich der mechanischen Lastpunkte von Pumpenaggregaten ist in Gleichung (32) der folgende annähernde Korrekturwert k_{corr} einzusetzen:

$$\frac{T}{T_{100\%(M)}} \geq 0,5 \cdot \frac{n}{n_{100\%(M)}} \Rightarrow k_{\text{corr}} = 1 \quad (36)$$

$$\frac{T}{T_{100\%(M)}} < 0,5 \cdot \frac{n}{n_{100\%(M)}} \Rightarrow k_{\text{corr}} = \left(\frac{T/T_{100\%(M)}}{0,5 \cdot \frac{n}{n_{100\%(M)}}} \right)^{-0.4}$$

6.4.3 Interaktion zwischen Pumpe und PDS

Das Pumpenmodell dient dazu, die hydraulischen Lastpunkte, die als Paare aus relativem Förderstrom $Q/Q_{\text{BEP},N}$ und relativer Energiehöhe der Pumpe $H/H_{\text{BEP},N}$ bestehen, in die entsprechenden mechanischen Lastpunkte umzuformen, die als Paare aus dem relativen Drehmoment $T/T_{\text{BEP},N}$ und der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$ bestehen.

Durch Einfügen der Werte $Q/Q_{\text{BEP},N}$ und $H/H_{\text{BEP},N}$ in Gleichung (10) und Multiplikation der Gleichung (10) mit $n/n_{N,PU}$ führt zu:

$$d_H \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^3 + c_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right) \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^2 + \left[b_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right)^2 - \frac{H}{H_{\text{BEP},N}} \right] \cdot \frac{n}{n_{N,PU}} + a_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{BEP},N}} \right)^2 = 0 \quad (37)$$

Diese ist eine kubische Gleichung für die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ eines Lastpunkts, der aus dem Paar aus den Werten $Q/Q_{\text{BEP},N}$ und $H/H_{\text{BEP},N}$ besteht und die arithmetisch gelöst werden kann, siehe Anhang E.

Die Werte der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$, erhalten aus der Auflösung der Gleichung (37), werden in Gleichung (17) eingefügt, aus der sich die entsprechenden Werte des relativen Drehmoments $T/T_{\text{BEP},N}$ ergeben.

Die Multiplikation mit der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$, dem relativen Drehmoment $T/T_{\text{BEP},N}$ und dem Wert $P_{\text{BEP},N}$ ergibt die Wellenleistung P am jeweiligen Lastpunkt

$$P = \frac{n}{n_{N,PU}} \cdot \frac{T}{T_{\text{BEP},N}} \cdot P_{\text{BEP},N} \quad (38)$$

Zur Bestimmung der Verluste im PDS mithilfe des PDS-Modells müssen die mechanischen Lastpunkte in die relative Drehzahl und das relative Drehmoment zu den Nennwerten des Elektromotors $n_{N,M}$ und $T_{N,M}$ umgeformt werden, jeweils:

$$\frac{n}{n_{N,M}} = \frac{n_{N,PU}}{n_{N,M}} \cdot \frac{n}{n_{N,PU}} \quad (39)$$

$$\frac{T}{T_{N,M}} = \frac{T_{\text{BEP},N}}{T_{N,M}} \cdot \frac{T}{T_{\text{BEP},N}} \quad (40)$$

Der Wert $T_{N,M}$ wird anhand von Gleichung (18) berechnet.

Für einen mechanischen Lastpunkt, der von den Werten aus Gleichung (39) und Gleichung (40) bestimmt wird, werden die zugehörigen Leistungsverluste $p_{L,PDS} = P_{L,PDS}/P_{N,M}$ des PDS mit den Gleichungen (32) bis (36) berechnet. Der entsprechende absolute Leistungsverlust des PDS ergibt sich aus

$$P_{L,PDS} = p_{L,PDS} \cdot P_{N,M} \quad (41)$$

Die Wellenleistung P_2 , die sich aus Gleichung (38) ergibt, sowie der Leistungsverlust des PDS, der aus Gleichung (41) ermittelt wird, werden addiert und das Ergebnis ist der entsprechende Wert der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 :

$$P_1 = P_2 + P_{L,PDS} \quad (42)$$

6.4.4 Bestimmung von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$ anhand Q_{BEP} und H_{BEP}

Um die Werte von $Q_{100\%}$ und $H_{100\%}$ zu bestimmen, wie sie in Abschnitt 4 definiert sind, sind die Funktion $\eta_{unit} = f(Q)$ und ihre Höchstwerte zu ermitteln.

Zu diesem Ziel werden die folgenden Schritte empfohlen:

1. Für die 5 in Gleichung (43) eingefügten Werte $Q/Q_{BEP,N} = 0,8, 0,9, 1,0, 1,1$ und $1,2$ werden die entsprechenden Werte der relativen Drehzahl $n/n_{N,PU}$ bei einer Frequenz des Stators, die mit der Stromnetzfrequenz übereinstimmt, und unter Berücksichtigung des Schlupfs des Asynchronmotors berechnet.
2. Für den Fall, dass das PDS in der Ausgangsleistung eingeschränkt ist und der Grenzwert unter der Nennleistung P_2 der Pumpe liegt, wird der Punkt $Q_{100\%}$ aus der Pumpenkennlinie ermittelt, die mit einer angemessenen Anzahl (z. B. $Q/Q_{BEP,N} = 0,1, 0,2 \dots 1$) an Punkten für die Ausgangsleistung P_2 berechnet wurde, wobei diese an den Grenzen der PDS-Ausgangsleistung angesetzt wurde. Unter Verwendung der Gleichung (12) kann die zugehörige relative Drehzahl der Pumpe für jeden $Q/Q_{BEP,N}$ berechnet werden. Die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ wird in Gleichung (10) zur Berechnung der relativen Energiehöhe $H/H_{BEP,N}$ eingesetzt. Die resultierenden Lastpunkte der leistungsbeschränkten Pumpenkennlinie müssen interpoliert werden und die resultierende Kennlinie dient als Grundlage, um den Punkt des besten Wirkungsgrads ($Q_{100\%}/H_{100\%}$) des Pumpenaggregats zu ermitteln.
3. Durch Einfügen der Werte von $Q/Q_{BEP,N}$ und der entsprechenden Werte von $n/n_{N,PU}$ in die entsprechende Gleichung (10) und (11) werden die entsprechenden Werte der relativen Energiehöhe der Pumpe $H/H_{BEP,N}$ und des relativen Wellendrehmoments $T/T_{BEP,N}$ berechnet.
4. Nach der Beschreibung in 6.4.3 werden die entsprechenden Werte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 berechnet.
5. Die entsprechenden Werte des Gerätewirkungsgrads η_{unit} werden mit Gleichung (27) berechnet.
6. Die Relation $\eta_{unit} = f(Q/Q_{BEP,N})$ wird mit einem Polynom dritten Grades als Ausgleichsfunktion auf Grundlage der 5 berechneten Paare von $Q/Q_{BEP,N}$ und η_{unit} angenähert, siehe Gleichung (28).
7. Der Wert von $Q_{100\%}/Q_{BEP,N} = Q_{BEP,unit}/Q_{BEP,N}$ wird ermittelt mit Gleichung (9) berechnet und als der Wert aus den 2 Lösungen gewählt, der dem Wert 1,0 am nächsten ist.
8. Der Wert von $H_{100\%}/H_{BEP,N} = H_{BEP,unit}/H_{BEP,N}$ wird durch Einfügen der Werte $Q_{100\%}/Q_{BEP,N}$ und $n/n_{N,PU}$ in Gleichung (10) berechnet.

6.4.5 Bestimmung von $P_{1,avg,v}$ und $P_{1,avg,c}$ für Pumpenaggregate mit PDS

Aus der in Abschnitt 4 (Betriebsarten M3, M4, M5) festgelegten Referenz-Druckkennlinie ergeben sich die Werte des relativen Förderstroms $Q/Q_{100\%}$ und der relativen Energiehöhe der Pumpe $H/H_{100\%}$ für jeden spezifischen hydraulischen Lastpunkt.

Zur Bestimmung von $P_{1,avg,v}$ und $P_{1,avg,c}$ werden jeweils die folgenden Schritte ausgeführt:

1. Die Werte des relativen Förderstroms $Q/Q_{BEP,N}$ und der relativen Energiehöhe der Pumpe $H/H_{BEP,N}$, die jeweils den durch das Bezugs-Lastfluss-Profil und die Referenz-Druckkennlinie definierten Werten $Q/Q_{100\%}$ und $H/H_{100\%}$ entsprechen (siehe Abschnitt 4), werden anhand der Umrechnungsformel berechnet

$$\frac{Q}{Q_{BEP,N}} = \left(\frac{Q_{100\%}}{Q_{BEP,N}} \right) \cdot \frac{Q}{Q_{100\%}} \quad (43)$$

$$\frac{H}{H_{BEP,N}} = \left(\frac{H_{100\%}}{H_{BEP,N}} \right) \cdot \frac{H}{H_{100\%}} \quad (44)$$

Dabei ist der Umrechnungsfaktor wie in 6.4.4 beschrieben bestimmt wird.

2. Durch Einfügen der Werte $Q/Q_{BEP,N}$ und $H/H_{BEP,N}$, die jeweils aus den Gleichungen (43) und (44) erhalten wurden, in Gleichung (10) und Multiplikation der Gleichung (10) mit $n/n_{N,PU}$ zu:

$$d_H \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^3 + c_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right) \cdot \left(\frac{n}{n_{N,PU}} \right)^2 + \left[b_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^2 - \frac{H}{H_{BEP,N}} \right] \cdot \frac{n}{n_{N,PU}} + a_H \cdot \left(\frac{Q}{Q_{BEP,N}} \right)^2 = 0 \quad (45)$$

Diese ist eine kubische Gleichung für die relative Drehzahl $n/n_{N,PU}$ für jeden der von der Referenz-Druckkennlinie bestimmten Lastpunkt und kann arithmetisch gelöst werden, siehe Anhang D.

3. Durch Einfügen der Werte von $Q/Q_{BEP,N}$ und der entsprechenden Werte von $n/n_{N,PU}$ in Gleichung (11) werden die entsprechenden Werte des relativen Wellendrehmoments $T/T_{BEP,N}$ berechnet.
4. Nach der Beschreibung in 6.4.3 werden die entsprechenden Werte der elektrischen Leistungsaufnahme P_1 berechnet.
5. Das gewichtete Mittel der elektrischen Leistung $P_{1,avg,c}$ wird mit Gleichung (4) und $P_{1,avg,v}$ mit Gleichung (6) berechnet.
6. Mithilfe von diesem $P_{1,avg,c}$ bzw. $P_{1,avg,v}$ kann jeweils EEL_c oder EEL_v entsprechend der Abschnitte 7 und 8 bestimmt werden.

7 Bestimmung der elektrischen Bezugs-Leistungsaufnahme $P_{1,ref}$

Für einzelne Pumpenaggregate wird die elektrische Bezugsleistung $P_{1,ref}$ wie folgt festgelegt:

$P_{1,ref}$ ist ein theoretischer Wert, der dazu dient, auf die tatsächliche elektrische Leistungsaufnahme P_1 eines reellen Pumpenaggregats zu verweisen und zu einem dimensionslosen Wert für die Energieeffizienz zu verweisen zu führen.

$P_{1,\text{ref}}$ wird als elektrische Leistungsaufnahme eines Pumpenaggregats definiert, das

- bei Förderstrom $Q_{100\%}$ und Energiehöhe der Pumpe $H_{100\%}$ betrieben wird,
- für das $n_{100\%} = n_{N,P}$ gilt,
- mit sauberem kaltem Wasser bei Betriebsbedingungen von $(n_{N,P} = 2\,900\text{ min}^{-1}, Q_{100\%}, H_{100\%})$ oder $(n_{N,P} = 1\,450\text{ min}^{-1}, Q_{100\%}, H_{100\%})$, je nachdem welche Drehzahl $n_{N,P}$ am nächsten an der tatsächlichen Drehzahl in der Prüfung liegt,
- einen Wirkungsgrad in Übereinstimmung mit Gleichung 7.42 sowie C-Werte nach Tabelle 4 hat,
- von einem (fiktiven) 3-Phasen-Käfigläufer-Induktionsmotor angetrieben wird, der
- direkt von einem Stromnetz mit einer Frequenz von 50 Hz gespeist wird,
- für die Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PU} = 2\,900\text{ min}^{-1}$ 2-polig bzw. für die Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PU} = 1\,450\text{ min}^{-1}$ 4-polig entsprechend $n_{N,P}$ ist,
- über eine Nennleistungsausgabe verfügt, die der Leistung der Welle bei Nennbetriebsbedingungen entspricht,
- bei genau dem Motorwirkungsgrad läuft, der als Mindestwert für Motoren der Wirkungsgradklasse IE 3 nach EN 60034-30-1 gefordert ist.

Definitionsgemäß wird die Bezugs-Leistung $P_{1,\text{ref}}$ für ein tatsächliches Pumpenaggregat auf folgenden Weise berechnet:

- die hydraulische Bezugs-Leistung $P_{\text{hyd,ref}}$

$$P_{\text{hyd,ref}} = (\rho_W \cdot g \cdot (Q_{100\%}/3600) \cdot H_{100\%})/1000 \quad [\text{kW}] \quad (46)$$

- die spezifische Drehzahl der Pumpe n_s

$$n_s = n_{100\%} \cdot \frac{\sqrt{Q_{100\%}/3600}}{[H_{100\%}/i]^{0,75}} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (47)$$

In Gleichung (46) beträgt die Dichte von sauberem, kaltem Wasser ρ_W 1 000 kg/m³ und die Gravitationskonstante g ist 9,81 m/s². Als Einheiten sind [m³/h] für den Förderstrom Q_{BEP} und [m] für die Energiehöhe der Pumpe $H_{100\%}$ zu verwenden. Die hydraulische Bezugs-Leistung $P_{\text{hyd,ref}}$ ergibt sich aus Gleichung (46) in der Einheit [kW].

In Gleichung (47) sind als Einheiten [1/min] für die Nenndrehzahl $n_{100\%}$, [m³/h] für den Förderstrom Q_{BEP} und [m] für die Energiehöhe der Pumpe H_{BEP} zu verwenden. i ist die Anzahl der Stufen bei Mehrstufen-pumpen; im Fall einer einstufigen Pumpe gilt $i = 1$.

In Übereinstimmung mit EN 16480 wird der Bezugs-Pumpenwirkungsgrad $\eta_{\text{ref,PU}} = \eta_{100\%}$ mit folgender Gleichung angegeben:

$$\eta_{100\%} = -11,48(\ln(n_s))^2 - 0,85 \cdot (\ln(Q_{100\%}))^2 - 0,38 \cdot \ln(n_s) \cdot \ln(Q_{100\%}) + 88,59 \ln(n_s) + 13,46 \cdot \ln(Q_{100\%}) - C \quad (48)$$

Die Konstante C ist vom Pumpentyp und von der Nenndrehzahl $n_{100\%}$ der Pumpe abhängig. Werte von C (nach EN 16480 mit $MEI = 0,4$) sind in Tabelle 4 aufgeführt. Aus Gleichung (48) ergibt sich der Referenzwert des Pumpenwirkungsgrad in [%].

Tabelle 4 — Werte der Konstante C je Pumpenaggregattyp für Gleichung (48)

Pumpentyp (siehe Abschnitt Anhang A)	Nenndrehzahl der Pumpe $n_{N,PU}$ [1/min]	C
ESOB	1 450	128,07
ESOB	2 900	130,27
ESCC	1 450	128,46
ESCC	2 900	130,77
ESCCi	1 450	132,30
ESCCi	2 900	133,69
MS-V	2 900	133,95
MS-H	2 900	[noch festzulegen]

Mit der hydraulischen Bezugs-Leistung $P_{\text{hyd,ref}}$ aus Gleichung (46) und mit dem Bezugs-Pumpenwirkungsgrad $\eta_{\text{ref,PU}}$ aus Gleichung (48) wird die Bezugs-Wellenleistung $P_{2,\text{ref}}$ in der Einheit [kW] berechnet:

$$P_{2,\text{ref}} = 100 \cdot \frac{P_{\text{hyd,ref}}}{\eta_{\text{ref,PU}}} \text{ [kW]} \quad (49)$$

In Übereinstimmung mit EN 60034-30-1 wird der Wirkungsgrad $\eta_{\text{ref,M}}$ des fiktiven Motors, der zur Berechnung von $P_{1,\text{ref}}$ dient, mit folgender Gleichung angegeben:

$$\eta_{\text{ref,M}} = a \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{P_{2,\text{ref}}}{1 \text{ kW}} \right) \right]^3 + b \cdot \left[\log_{10} \left(\frac{P_{2,\text{ref}}}{1 \text{ kW}} \right) \right]^2 + c \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{2,\text{ref}}}{1 \text{ kW}} \right) + d \text{ [%]} \quad (50)$$

Die Werte der Konstanten a , b , c und d in Gleichung (50) für Elektromotoren, die von einem 50 Hz-Stromnetz gespeist werden, sind in [Verweisung] nach EN 60034-30-1 aufgeführt. Aus Gleichung (50) ergibt sich der Referenzwert des Motorwirkungsgrad in [%].

Tabelle 5 — Werte der Konstanten in Gleichung (50) für die Motorwirkungsgradklasse IE3

Koeffizient	Typ des Motors	
	2-polig	4-polig
'a'	0,356 9	0,077 3
'b'	-3,307 6	-1,895 1
'c'	11,610 8	9,298 4
'd'	82,250 3	83,702 5

Zuletzt wird mit der Bezugs-Wellenleistung $P_{2,\text{ref}}$ aus Gleichung (49) und mit dem Bezugs-Motorwirkungsgrad $\eta_{\text{ref},M}$ aus Gleichung (50) und Tabelle 5 die elektrische Leistung $P_{1,\text{ref}}$ in der Einheit [kW] wie folgt ermittelt:

$$P_{1,\text{ref}} = 100 \cdot \frac{P_{2,\text{ref}}}{\eta_{\text{ref},M}} \text{ [kW]} \quad (51)$$

8 Berechnung des Energieeffizienzindex (EEI)

Der EEI für die verschiedenen Betriebsarten (siehe Abschnitt 4) wird bestimmt mittels

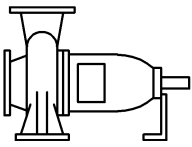
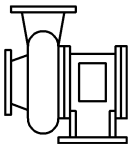
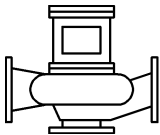
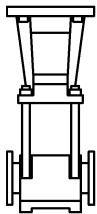
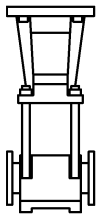
$$\text{EEI}_C = \frac{P_{1,\text{avg},C}}{P_{1,\text{ref}}} \quad (52)$$

$$\text{EEI}_V = \frac{P_{1,\text{avg},V}}{P_{1,\text{ref}}} \quad (53)$$

Anhang A (normativ)

Anwendungsbereich

Tabelle A.1 — Pumpentypen

ESOB Wasserpumpe mit axialem Eintritt, eigene Lagerung (en: End Suction Own Bearings pump)	
ESCC Wasserpumpe mit axialem Eintritt, Blockausführung (en: End Suction Close Coupled pump)	
ESSCi Block-Wasserpumpe mit axialem Eintritt, Inlineausführung (en: Inline End Suction Close Coupled pump)	
MS-V mehrstufige vertikale Wasserpumpe (en: Vertical Multistage pump)	
MS-H mehrstufige Tauch-Wasserpumpe (en: Horizontal Multistage Pump Unit)	

- Wasserpumpenaggregate, ausgelegt auf sauberes Wasser mit Temperaturen zwischen -10 °C und $+120\text{ °C}$
- Pumpen mit axialem Eintritt (ESOB, ESCC und ESSCi) Einstufiges Trockenläufer-Kreiselpumpenaggregat mit axialem Eintritt in Top- oder Inlineausführung der Rohrverbindungen und mit Spiralgehäuse, das auf Drucke von bis zu 16 bar ausgelegt ist, ESOPB (mit axialem Eintritt, eigene Lagerung), ESCC (fest gekuppelte Magnetkupplung) und ESSCi (Inlineausführung) Alle Pumpen mit Flansch- oder Gewindestutzen in metrischen und zölligen Maßen

Pumpengrößen mit Leistungsdaten nach Tabelle A.2.
- Mehrstufenpumpen (MS-V & MS-H) Mehrstufige ($I > 1$) Trockenläufer-Kreiselpumpenaggregate, die für Drucke von bis zu 25 bar ausgelegt sind. Pumpengrößen mit Leistungsdaten nach Tabelle A.2.

Tabelle A.2 — Pumpen im Anwendungsbereich

Pumpentyp	Definierter Anwendungsbereich				
ESOB ESCC ESCCi	$n = 1\,450 \text{ min}^{-1}$	$Q_{\text{BEP}} \geq 6 \text{ m}^3/\text{h}$	$H_{\text{BEP}} \leq 90 \text{ m}$	$6 \text{ min}^{-1} \leq n_s \leq 80 \text{ min}^{-1}$	$P_2 \leq 150 \text{ kW}$
ESOB ESCC ESCCi	$n = 2\,900 \text{ min}^{-1}$	$Q_{\text{BEP}} \geq 6 \text{ m}^3/\text{h}$	$H_{\text{BEP}} \leq 140 \text{ m}$	$6 \text{ min}^{-1} \leq n_s \leq 80 \text{ min}^{-1}$	$P_2 \leq 150 \text{ kW}$
MS-V	$n = 2\,900 \text{ min}^{-1}$			$Q_{\text{BEP}} \leq 100 \text{ m}^3/\text{h}$	
MS-H	$n = 2\,900 \text{ min}^{-1}$			$Q_{\text{BEP}} \leq 100 \text{ m}^3/\text{h}$ [noch festzulegen]	