

Prototypenbestätigung

Nr.: FGH-P-2024-003-1

Unterzeichnetes Exemplar Nr. 1

Typ:	Windenergie- Erzeugungseinheiten	ENERCON E-175 EP5 E2 in den Konfigurationen FT/FTQ/FTS/FTQS
Technische Daten:	Bemessungswirkleistung: Bemessungsscheinleistungen: Bemessungsspannung: Nennfrequenz: Steuerungstyp: Maschinenkonzept: Erste Inbetriebnahme:	7.000 kW 7.650 kVA (FT/FTS) 8.300 kVA (FTQ/FTQS) 750 V 50 Hz PI-CS, Version FACTS 2.0 Vollumrichter, getriebelos 14. Mai 2025
Erforderliche Zusatzkomponente:	EZA-Regler ENERCON SCADA Farm Control Unit E2 (FCU E2)	
Hersteller:	ENERCON Global GmbH , Dreekamp 5, D-26605 Aurich	
VDE-Anwendungsregeln:	VDE-AR-N 4110:2023-09 VDE-AR-N 4120:2018-11 VDE-AR-N 4130:2018-11	
Herstellererklärung:	Erklärung zur Prototypenbestätigung E-175 EP5 E2 Dokument D03053855/0.0 vom 31. Juli 2024	

Diese Prototypenbestätigung umfasst 18 Seiten und ersetzt die Prototypenbestätigung FGH-P-2024-003 vom 16. August 2024. Die Laufzeit der Prototypenbestätigung wird auf Grundlage der Inbetriebnahme der ersten Erzeugungseinheit (EZE) des Typs ENERCON E-175 EP5 E2 in Deutschland auf den 13. Mai 2027 beschränkt.

Der Hersteller hat der Zertifizierungsstelle die Einführung des oben aufgeführten neuen Typs einer Erzeugungseinheit angezeigt, der bezüglich der elektrischen Eigenschaften Modifikationen und Weiterentwicklungen gegenüber den aktuell bekannten Windenergie-Erzeugungseinheiten des Herstellers aufweisen. Die Modifikationen umfassen insbesondere die Erhöhung der Bemessungsleistung auf 7000 kW und den weiterentwickelten Generator. Alle relevanten elektrotechnischen Komponenten befinden sich bei diesem EZE-Typ in der Gondel.

Des Weiteren bestätigt der Hersteller mit dem Einsatz der Steuerung FACTS 2.0 in der EZE die umfängliche Erfüllung der einheitenbezogenen Anforderungen der VDE-AR-N 4110:2023-09 [3], VDE-AR-N 4120:2018-11 [1] sowie VDE-AR-N 4130:2018-11 [2] für den Anschluss und Betrieb von Kundenanlagen am deutschen Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, welche durch eine entsprechende Einstellung von Betriebsparametern ermöglicht wird.

Nach Prüfung der technischen Spezifikationen auf Basis der oben aufgeführten Herstellererklärungen der Firma ENERCON Global GmbH kommt die Zertifizierungsstelle zu dem Ergebnis, dass der neue EZE-Typ technische Weiterentwicklungen und Neuerungen aufweist, welche Auswirkungen auf die zu zertifizierenden Eigenschaften haben. Der neue EZE-Typ erfüllt somit die Voraussetzungen für einen Prototypen nach Kapitel 12 der o.g. VDE-Anwendungsregeln.

Aachen, 22. Mai 2025



Dipl.-Ing. Parsa Tavassoli,
Leiter der FGH Zertifizierungsstelle

Abschnitt A: Schematisches Übersichtsbild der EZE

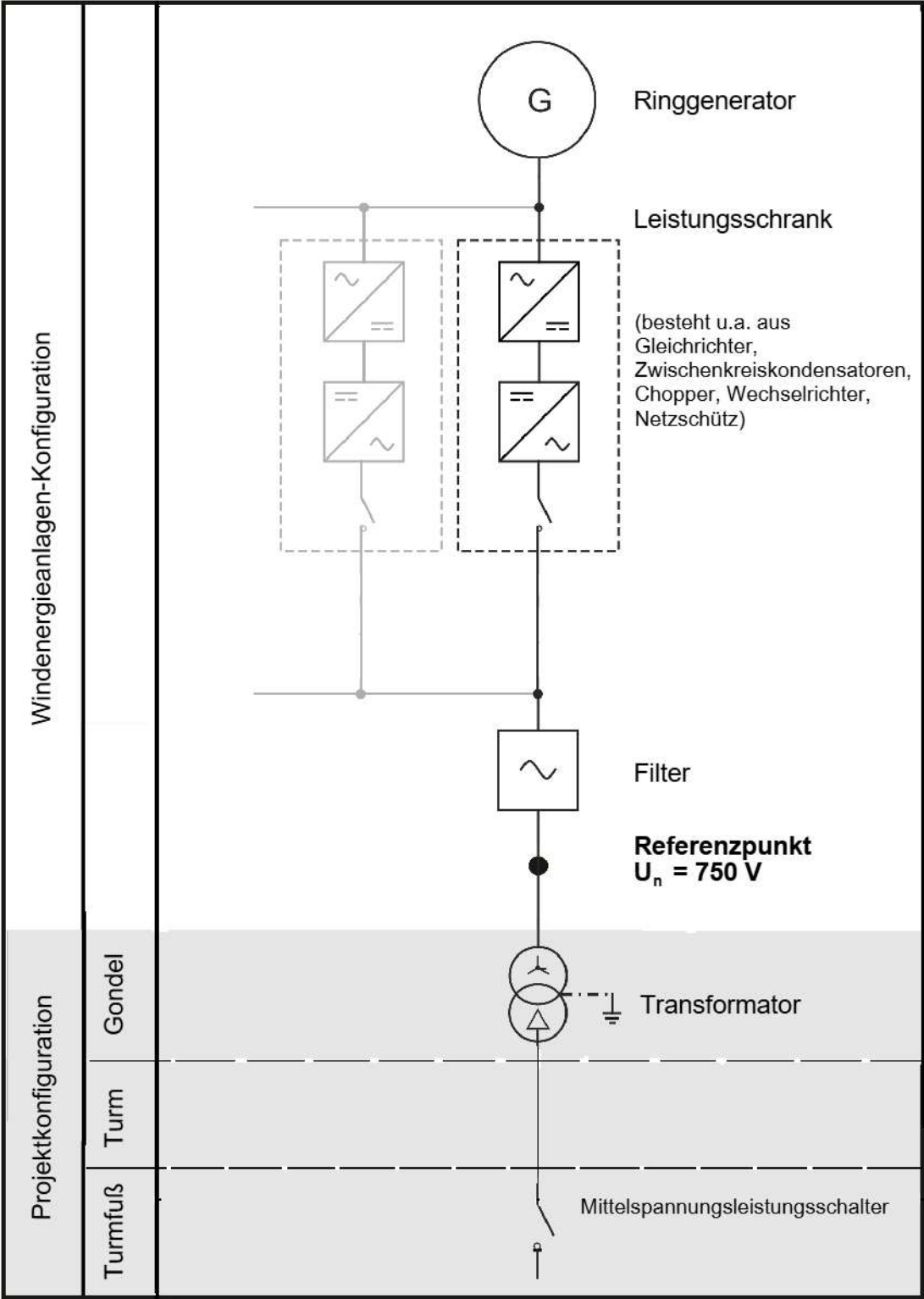


Abbildung 1: Schematisches Übersichtsbild der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
(Quelle: Herstellererklärung D03046307/0.0-de [8], D03046306/0.0-de [11], D03046305/0.0-de [9], D03046304/0.0-de [10])

Abschnitt B: Technische Daten der EZE

Elektrische Größe / Merkmal	Wert / Beschreibung	Einheit
Bemessungswirkleistung P_{rE} (Nennwirkleistung P_N bzw. P_n)	7.000	kW
Bemessungsspannung U_r (Nennspannung U_N bzw. U_n)	750	V
Nennfrequenz f_N	50	Hz
Nennstrom I_N (bei $\cos\varphi = 1$)	5.389	A
Bemessungsscheinleistung $S_r^{1)}$		
FT / FTS	7.650	kVA
FTQ / FTQS	8.300	kVA
Max. übererregte Blindleistung $Q_{\max, \text{übererregt}}$ (bei P_{rE} und U_r)		
FT / FTS	+3.010	kvar
FTQ / FTQS	+4.410	kvar
Max. untererregte Blindleistung $Q_{\max, \text{untererregt}}$ (bei P_{rE} und U_r)		
FT / FTS	-3.010	kvar
FTQ / FTQS	-4.410	kvar
Bemessungsstrom (max. Dauerbetriebsstrom) $I_r^{2)}$		
FT / FTS	7.200	A
FTQ / FTQS	7.200	A
Max. Anfangskurzschlusswechselstrom $I_{k, \max}''$		
FT / FTS	7.560	A
FTQ / FTQS	7.560	A
Max. Stoßkurzschlussstrom $i_{p, \max}$		
FT / FTS	10.691	A
FTQ / FTQS	10.691	A
Max. Ausschaltwechselstrom $I_{b, \max}$		
FT / FTS	7.560	A
FTQ / FTQS	7.560	A
Max. Dauerkurzschlussstrom $I_{k, \max}$		
FT / FTS	7.560	A
FTQ / FTQS	7.560	A
Nennwindgeschwindigkeit	12,5	m/s
Einschaltwindstärke	2,5	m/s
Steuerungstyp	PI-CS, Version FACTS 2.0	
Generator-Hersteller	ENERCON GmbH	
Generatorbezeichnung	E-175 EP5 E2-GE-01-01	
Rotor-Hersteller	ENERCON GmbH	
Rotorbezeichnung	E-175 EP5-RB-01	
Rotordurchmesser	175	m
Umrichter-Hersteller	ENERCON GmbH	
Umrichterbezeichnung	Powerboost-Converter - PBC	
Bemessungsscheinleistung	2.338	kVA
Anzahl Umrichterschränke		
FT / FTS	4	
FTQ / FTQS	4	

Tabelle 1: Technische Daten der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS

1) Ermittelt aus P_{rE} und $Q_{\max}$

2) Ermittelt aus der Summe der Bemessungsströme der Umrichter mit je 1.800 A

(Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

Abschnitt C: Betriebsbereiche der EZE in Normalbetrieb

C.1 Grenzen der Spannung und Frequenz

Tabelle 2 gibt die Grenzen der Spannung und Frequenz für den quasistationären Betrieb der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS (je $P_{rE} = 7.000 \text{ kW}$) an. Als Bezugsspannung am Referenzpunkt dient die Nennspannung $U_r = 750 \text{ V}$ der EZE (vgl. Abbildung 1).

Beschreibung	Parameter	Wert
Kurzzeitige Maximalspannung (max. 60 s)	$U_{\max, \text{temp}}$	120% U_r
Maximale Dauerbetriebsspannung	$U_{\max}$	115% U_r
Minimale Dauerbetriebsspannung	$U_{\min}$	85% U_r
Kurzzeitige Minimalspannung (max. 60 s)	$U_{\min, \text{temp}}$	80% U_r
Maximalfrequenz	$f_{\max}$	53 Hz
Nennfrequenz	f_N	50 Hz
Minimalfrequenz	$f_{\min}$	47 Hz
Maximaler Frequenzgradient bei Netzfrequenzschwankungen	—	10 Hz/s

Tabelle 2: Betriebsbereiche und Grenzen der einheitenbezogenen Spannungsschutzfunktionen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS

(Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

C.2 Wirkleistungsbereich

Die Sollwertvorgabe erfolgt in der Regel über den übergeordneten EZA-Regler vom Typ ENERCON FCU E2. Die Wirkleistung lässt sich alternativ in der EZE-Steuerung gemäß Tabelle 3 einstellen. Die Einstelldynamik bei Wirkleistungssteigerungen wird durch die einstellbaren Gradienten nach Tabelle 12 bestimmt.

	Einstellbereich	Schrittweite	Defaultwert
Wirkleistungseinstellung in der EZE	0 kW ... 7.000 kW	5 kW	7.000 kW

Tabelle 3: Wirkleistungsbereich in der EZE-Steuerung

(Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

C.3 Blindleistungsstellbereich

Die Abbildungen 2 bis 5 zeigen jeweils den Blindleistungsstellbereich der EZE in Abhängigkeit von der Wirkleistung für die Konfigurationen FT, FTS, FTQ und FTQS. Der Export von Blindleistung (Abgabe von Blindleistung in das Netz) entspricht dem Verhalten einer übererregten Synchronmaschine. Der Import von Blindleistung (Aufnahme von Blindleistung aus dem Netz) entspricht dem Verhalten einer untererregten Synchronmaschine (nach IEC 60034-3:2007).

Die Sollwertvorgabe einer Blindleistung kann sowohl direkt in der EZE-Steuerung gemäß Tabelle 4 als auch über einen übergeordneten Parkregler erfolgen.

Parameter	Einstellbereich	Schrittweite
Blindleistung Q	siehe Abbildungen 2 bis 5	5 kvar
$\tan \varphi = Q/P$	-3 ... 3	0,005

Tabelle 4: Einstellbereich der Blindleistung der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
 (Quelle: Herstellererklärung D03046307/0.0-de [8], D03046306/0.0-de [11], D03046305/0.0-de [9], D03046304/0.0-de [10])

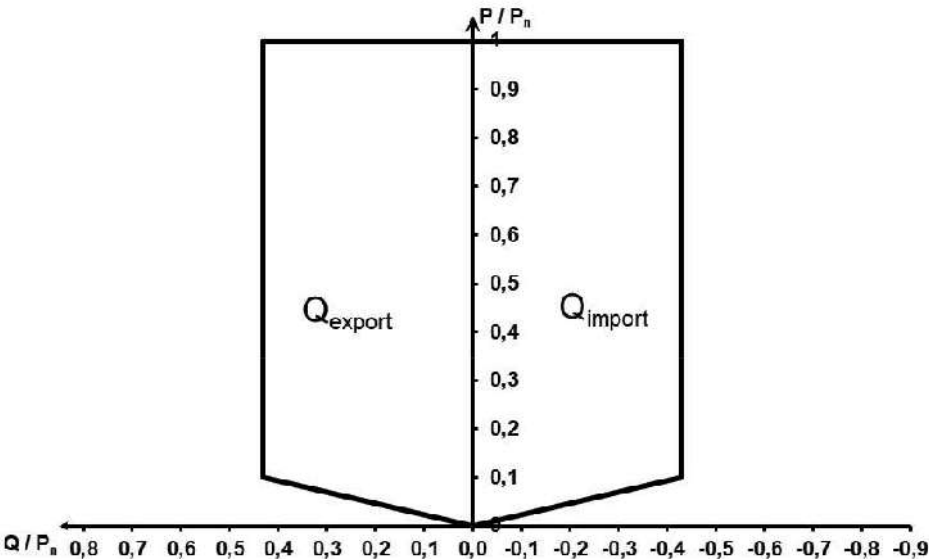


Abbildung 2: Blindleistungsstellbereich EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT
 Rot: 90% U_r , schwarz: $\geq 100\%$ U_r (überlappend)
 Maximale übererregte Blindleistung $Q_{\text{export, max}} = 0,43 P_{rE}$ (3.010 kvar)
 Maximale untererregte Blindleistung $Q_{\text{import, max}} = -0,43 P_{rE}$ (-3.010 kvar)
 (Quelle: Herstellererklärung D03046307/0.0-de [8])

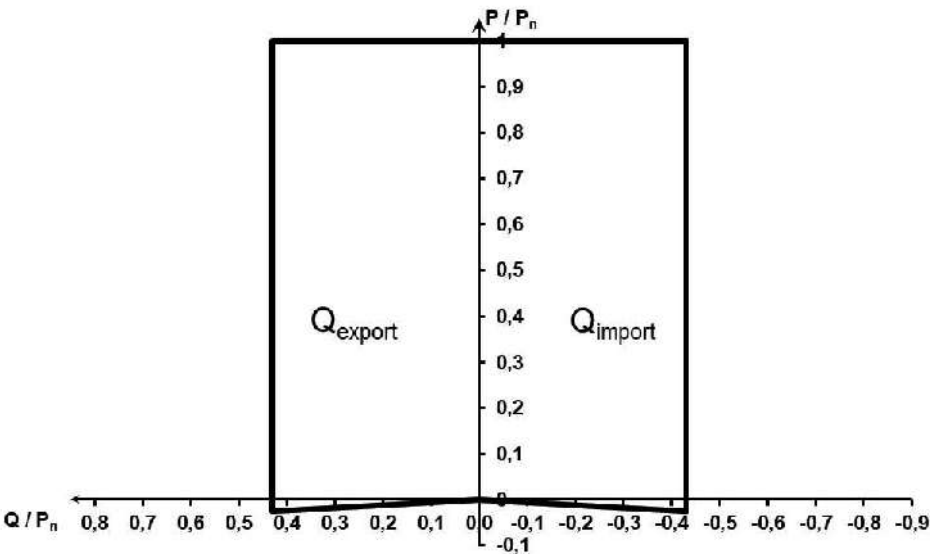


Abbildung 3: Blindleistungsstellbereich EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTS
 Rot: 90% U_r , schwarz: $\geq 100\%$ U_r (überlappend)
 Maximale übererregte Blindleistung $Q_{\text{export, max}} = 0,43 P_{rE}$ (3.010 kvar)
 Maximale untererregte Blindleistung $Q_{\text{import, max}} = -0,43 P_{rE}$ (-3.010 kvar)
 (Quelle: Herstellererklärung D03046306/0.0-de [11])

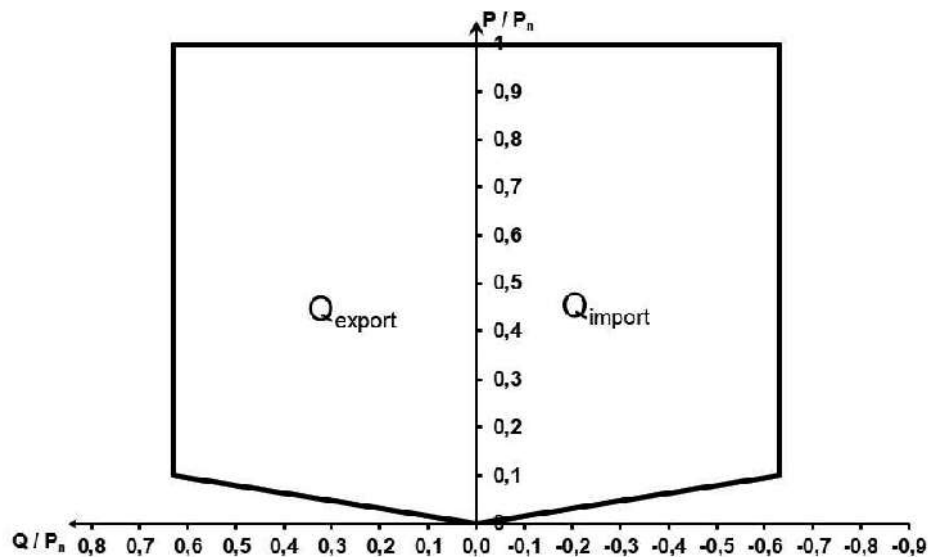


Abbildung 4: Blindleistungsstellbereich EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTQ

Rot: 90% U_r , schwarz: $\geq 100\%$ U_r

Maximale übererregte Blindleistung $Q_{\text{export, max}} = 0,63 P_{rE}$ (4.410 kvar)

Maximale untererregte Blindleistung $Q_{\text{import, max}} = -0,63 P_{rE}$ (-4.410 kvar)

(Quelle: Herstellererklärung D03046305/0.0-de [9])

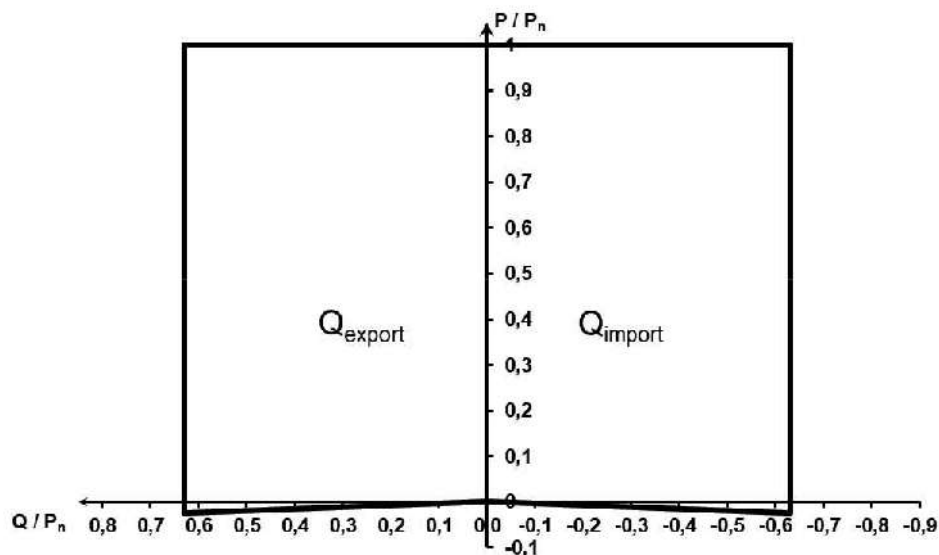


Abbildung 5: Blindleistungsstellbereich EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTQS

Rot: 90% U_r , schwarz: $\geq 100\%$ U_r

Maximale übererregte Blindleistung $Q_{\text{export, max}} = 0,63 P_{rE}$ (4.410 kvar)

Maximale untererregte Blindleistung $Q_{\text{import, max}} = -0,63 P_{rE}$ (-4.410 kvar)

(Quelle: Herstellererklärung D03046304/0.0-de [10])

Die Tabellen 5 und 6 fassen die Eckpunkte des Blindleistungsstellbereiches für die EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS (je 7.000 kW) und EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTQ/FTQS (je 7.000 kW) bei Überspannungen bis zu 120% U_r zusammen.

P/P_{rE}	100% bis 110% U_r		116% U_r		120% U_r	
	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}
ENERCON E-175 EP5 E2 FT ($Q = \pm 3.010 \text{ kvar}$)						
0,0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,430	-0,430	0	-0,430	-0,330	-0,430
1,0	0,430	-0,430	0	-0,430	-0,330	-0,430
ENERCON E-175 EP5 E2 FTS ($Q = \pm 3.010 \text{ kvar}$)						
0,0	0,430	-0,430	0	-0,430	-0,330	-0,430
1,0	0,430	-0,430	0	-0,430	-0,330	-0,430

Tabelle 5: Eckpunkte der Wirk- und Blindleistung bei Nennspannung sowie Überspannungen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS (7.000 kW)

(Quelle: Herstellererklärung (D03046307/0.0-de [8] und D03046306/0.0-de [11]))

P/P_{rE}	100% bis 106% U_r		115% U_r		120% U_r	
	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}	Q_{export}/P_{rE}	Q_{import}/P_{rE}
ENERCON E-175 EP5 E2 FTQ ($Q = \pm 4.410 \text{ kvar}$)						
0,0	0	0	0	0	0	0
0,1	0,630	-0,630	0	-0,630	-0,330	-0,630
1,0	0,630	-0,630	0	-0,630	-0,330	-0,630
ENERCON E-175 EP5 E2 FTQS ($Q = \pm 4.410 \text{ kvar}$)						
0,0	0,630	-0,630	0	-0,630	-0,330	-0,630
1,0	0,630	-0,630	0	-0,630	-0,330	-0,630

Tabelle 6: Eckpunkte der Wirk- und Blindleistung bei Nennspannung sowie Überspannungen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTQ/FTQS (7.000 kW)

(Quelle: Herstellererklärung (D03046306/0.0-de [11] und D03046304/0.0-de [10]))

Die Tabellen 7 und 8 geben den detaillierten Blindleistungsstellbereich bei Unterspannungen bis zu 80% U_r im gesamten Wirkleistungsbereich. Zwischen den einzelnen Arbeitspunkten kann linear interpoliert werden.

P/P _{re}	95% U _r		90% U _r		85% U _r		80% U _r	
	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})
0,50	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,52	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,54	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,56	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,58	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,60	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,62	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,64	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,66	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,68	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,70	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,72	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,74	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,76	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,78	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,80	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,81	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,82	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,83	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,84	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,85	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,86	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,87	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,88	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,89	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,90	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,91	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,92	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,93	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,94	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,95	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,96	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430
0,97	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,420
0,98	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,410	-0,390
0,99	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,380	-0,370
1,00	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,430	-0,430	0,350	-0,340

Tabelle 7: Wirkleistungsabhängiges Blindleistungsvermögen bei Unterspannungen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT und ENERCON E-175 EP5 E2 FTS (je 7.000 kW)
 (Quelle: Herstellererklärung D03046307/0.0-de [8], D03046306/0.0-de [11])

P/P _{re}	95% U _r		90% U _r		85% U _r		80% U _r	
	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})	Q/P _{re} (Q _{export})	Q/P _{re} (Q _{import})
0,50	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,52	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,54	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,56	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,58	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,60	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,62	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,64	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,66	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,68	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,70	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,72	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,74	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,76	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,78	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,80	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,81	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,82	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,83	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,84	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630
0,85	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,620
0,86	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,620	-0,610
0,87	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,610	-0,600
0,88	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,600	-0,580
0,89	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,580	-0,570
0,90	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,560	-0,550
0,91	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,550	-0,530
0,92	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,530	-0,520
0,93	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,510	-0,500
0,94	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,620	-0,610	0,490	-0,480
0,95	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,610	-0,600	0,470	-0,460
0,96	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,590	-0,580	0,450	-0,440
0,97	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,580	-0,560	0,430	-0,420
0,98	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,560	-0,540	0,410	-0,390
0,99	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,540	-0,530	0,380	-0,370
1,00	0,630	-0,630	0,630	-0,630	0,520	-0,510	0,350	-0,340

Tabelle 8: Wirkleistungsabhängiges Blindleistungsvermögen bei Unterspannungen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FTQ und ENERCON E-175 EP5 E2 FTQS (je 7.000 kW)
 (Quelle: Herstellererklärung D03046306/0.0-de [11], D03046304/0.0-de [10])

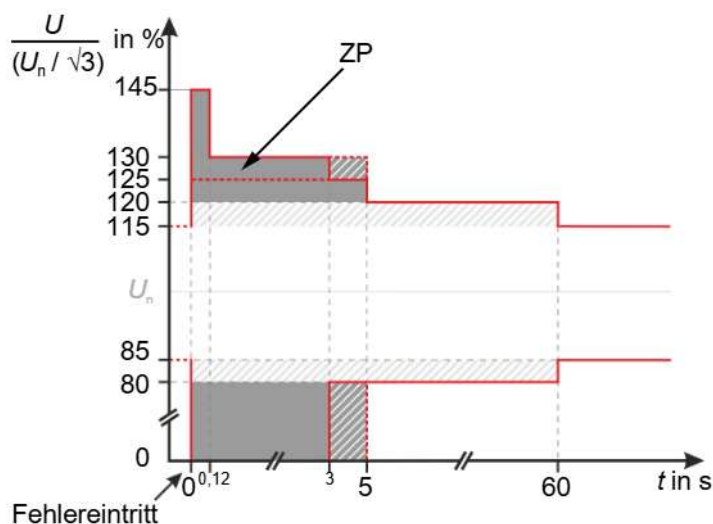
Abschnitt D: Fault-Ride-Through-Fähigkeit und dynamische Netzstützung

D.1 Fähigkeit den Netzfehler zu durchfahren (FRT)

Die EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS sind mit einer Fault Ride Through-Fähigkeit ausgestattet, die es ermöglicht, bei störungsbedingten Spannungseinbrüchen, Undervoltage Ride Through (UVRT), und Überspannungen, Overvoltage Ride Through (OVRT), für bis zu 5 Sekunden in Betrieb zu bleiben. Der Netzfehler wird erkannt, sobald die Spannung am Referenzpunkt der EZE unter einen Grenzwert abfällt oder über einen Grenzwert ansteigt.

Abbildung 6 zeigt den Bereich und die Grenzen der EZE beim Durchfahren von Netzfehlern. Dabei bleibt die EZE in Betrieb, wenn die Spannung am Referenzpunkt in allen Phasen während und nach dem Netzfehler innerhalb des mit der roten Grenzkurve markierten Bereichs liegt. Liegt die Spannung in einer Phase außerhalb dieses Bereichs, kann sich die EZE abschalten.

Eine zeitliche Begrenzung des FRT-Betriebs ergibt sich aus der thermischen Kapazität der Chopperwiderstände. Deren jeweilige Kapazität ist dimensioniert, die Nennleistung eines Umrichters für 3 s aufzunehmen. Zusätzlich ist eine Zeit von 100 ms für das Zurückführen der Wirkleistung auf den Vorfehlerwert vorgesehen, z. B. durch die Parametrierung eines entsprechenden Gradienten. Der Einsatz des Chopperwiderstands hängt maßgeblich von der Parametrierung des FRT-Betriebs (FRT-Strategie, k-Faktor) sowie von der Restspannung, vom Wirkleistungsarbeitspunkt der Windenergieanlage und von der Auslastung ab.



	Normalbetrieb/dauerhafter Betrieb
	Fehlerbetrieb
	Erweiterter Fehlerbetrieb (abhängig vom Einsatz der Chopperwiderstände)
	Grenzwerte

Abbildung 6: Maximale Spannungs- und Zeitgrenzen beim Durchfahren von Netzfehlern (FRT-Kennlinie) in der QU3-Betriebsstrategie mit dem unter- und überlagerten Zero Power Mode (ZP bzw. ZPM).
 (Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [4])

Zur Erfüllung unterschiedlicher Netzanschlussbedingungen bietet die FACTS 2.0-Steuerung verschiedene Betriebsstrategien mit oder ohne Stromeinspeisung im Fehlerbetrieb an. Die Parametrierung erfolgt projektspezifisch vor Inbetriebnahme der EZE. Die Betriebsstrategien bestehen aus mehreren Modi, die bei unterschiedlichen Netzzuständen aktiviert werden. Die einzelnen Betriebsmodi werden durch ein Über- oder Unterschreiten geeigneter Grenzwerte aktiviert, die auf den Anforderungen am jeweiligen Netzanschlusspunkt basieren und parametrierbar sind.

Die entsprechenden Einstellparameter am Beispiel einer sogenannten „QU3-Betriebsstrategie“ der EZE sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Ist ein fortlaufender Betrieb während und nach Netzfehlern nicht erwünscht, kann dies durch FRT-Parameter und/oder durch die Schutzparameter (vgl. Abschnitt E) eingestellt werden. Die in der Tabelle angegebenen Spannungen beziehen sich auf die Phasenspannungen (Leiter-Erde) der EZE-Nennspannung.

Parameter	Symbol	Einstellbereich	Schrittweite	Defaultwert
k-Faktor (Mitsystem)				
FRT	k	0 ... 10	0,1	2
sprunghafte Spannungsänderung	k	0 ... 10	0,1	2
k-Faktor (Gegensystem)				
FRT	k	0 ... 10	0,1	2
sprunghafte Spannungsänderung	k	0 ... 10	0,1	2
max. Zeit im ZPM	t_{dZPM}	0,1 ... 5 s	0,1 s	5 s
UVRT Spannung Fehlereintritt	U_{UVRT}	80 ... 95% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	80% $U_r/\sqrt{3}$
UVRT Spannung Fehlerklärung	U_{UVRT_OFF}	80 ... 95% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	80% $U_r/\sqrt{3}$
UVRT Spannung Start Timer	U_{tUVRT}	80 ... 95% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	80% $U_r/\sqrt{3}$
UVRT Spannung Aktivierung ZPM	U_{UVRT_ZPM}	0 ... 80% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	80% $U_r/\sqrt{3}$
max. Zeit im UVRT-Betrieb	t_{dUVRT}	0,1 ... 5 s	0,1 s	5 s
OVRT Spannung Fehlereintritt	U_{OVRT}	100 ... 125% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	120% $U_r/\sqrt{3}$
OVRT Spannung Fehlerklärung	U_{OVRT_OFF}	100 ... 125% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	120% $U_r/\sqrt{3}$
OVRT Spannung Start Timer	U_{tOVRT}	100 ... 125% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	120% $U_r/\sqrt{3}$
OVRT Spannung Aktivierung ZPM	U_{OVRT_ZPM}	110 ... 150% $U_r/\sqrt{3}$	0,5% $U_r/\sqrt{3}$	120% $U_r/\sqrt{3}$
max. Zeit im OVRT-Betrieb	t_{dOVRT}	0,1 ... 60 s	0,1 s	5 s
Wirkleistungsgradient (nach ZPM)	dP_{ZPM}/dt	0,05 ... 99 MW/s	0,05 MW/s	n.a.
Blindleistungsgradient (nach ZPM)	dQ_{ZPM}/dt	0,05 ... 99 Mvar/s	0,05 Mvar/s	n.a.

Tabelle 9: Einstellbereiche der Parameter in der QU3-Betriebsstrategie
 (Quelle: Herstellererklärung D0368521-4a [7])

D.2 Dynamische Netzstützung mit Hilfe einer Blindstromeinspeisung

Die FACTS-Steuerung ist in der Lage, in Abhängigkeit von den Netzanschlussbedingungen und der Betriebssituation des Energiesystems, den Ausgangsstrom der EZE während des Fehlers zu beeinflussen. Während des Netzfehlers ist je nach ausgewählter Betriebsstrategie eine Einspeisung von Wirk- und Blindstrom möglich. Die EZE kann sich jedoch abschalten, wenn ein Netzfehler erkannt wird und die Wirkleistung der EZE in diesem Moment kleiner als 2,5% P_{rE} ist.

In Abbildung 7 ist exemplarisch die vollständige dynamische Netzstützung anhand der Blindstromcharakteristik gemäß QU3-Betriebsstrategie dargestellt. Die zugehörigen Einstellwerte sind in Tabelle 9 beschrieben.

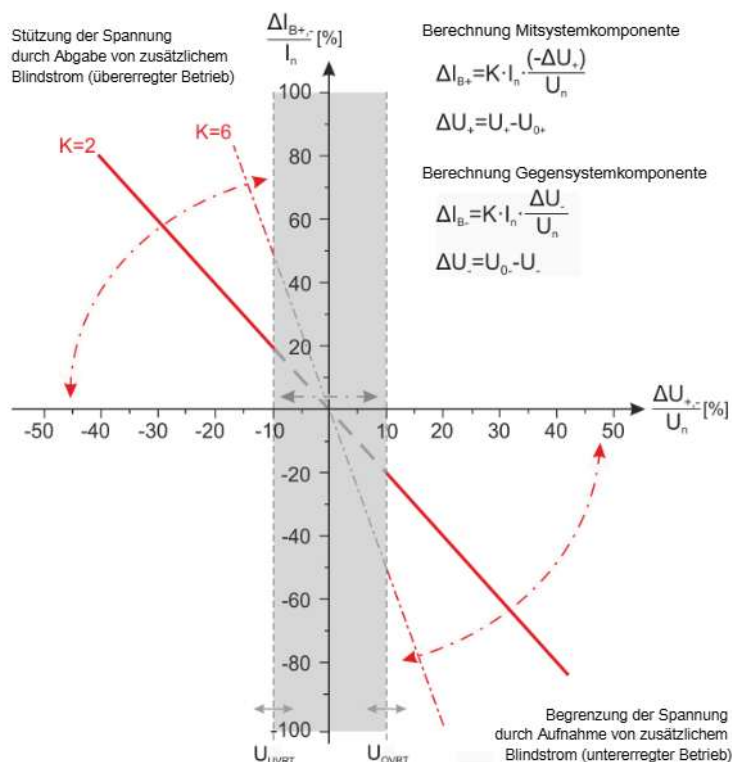


Abbildung 7: Blindstromcharakteristik gemäß QU3-Betriebsstrategie - Stützung/Begrenzung der Netzspannung bei $U_{UVRT} = 90\% U_r$ und $U_{OVRT} = 110\% U_r$
 (Quelle: Herstellererklärung D0368521-4a [7])

Die QU3-Betriebsstrategie ist mit der Option eines unterlagerten Zero Power Mode (ZPM) ausgestattet. Unterschreitet die Mitsystemspannung den eingestellten Spannungsschwellwert U_{UVRT_ZPM} , wechselt die FACTS-Steuerung in den ZPM. Bei geeigneter Parametrierung des Triggers $U_{UVRT_ZPM} = 70\% U_r / \sqrt{3}$ erfüllt diese Funktion die erweiterte Vorgabe an die eingeschränkte dynamische Netzstützung nach VDE-AR-N 4110:2023-09 [3]. Die Einstellmöglichkeit der Parameter für den unterlagerten Zero Power Mode kann der Tabelle 9 entnommen werden.

Abschnitt E: Schutzfunktionen der EZE

E.1 Entkopplungsschutz

Tabelle 10 gibt die Einstellmöglichkeiten der Spannungsschutz- und Frequenzschutzfunktionen der EZE bei $U_r = 750 \text{ V}$ und $f_N = 50 \text{ Hz}$ an. Im Folgenden entsprechen die Spannungen $U_r/\sqrt{3}$ und $\sqrt{2} U_r$ jeweils den Umrechnungen von Leiter-Leiter-Spannungen auf Leiter-Sternpunkt-Spannungen bzw. von Effektivwerten in Peak-Werte.

	Einheit/Bezugsg.	Einstellbereich	Schrittweite
Spannungsrückgangsschutz ($U<$)			
Auslösewert	% $U_r/\sqrt{3}$	5 ... 100	0,5
Verzögerungszeit	s	0,05 ... 60	0,01
Spannungsrückgangsschutz ($U<<$)			
Auslösewert	% $U_r/\sqrt{3}$	5 ... 100	0,5
Verzögerungszeit	s	0,05 ... 60	0,01
Spannungssteigerungsschutz ($U>$)			
Auslösewert	% $U_r/\sqrt{3}$	100 ... 130	0,5
Verzögerungszeit	s	0,05 ... 60	0,01
Spannungssteigerungsschutz ($U>>$)			
Auslösewert	% $U_r/\sqrt{3}$	100 ... 130	0,5
Verzögerungszeit	s	0,05 ... 60	0,01
Frequenzrückgangsschutz ($f<$)			
Auslösewert	Hz	47 ... 50	0,01
Verzögerungszeit	s	0,1 ... 60	0,01
Frequenzrückgangsschutz ($f<<$)			
Auslösewert	Hz	47 ... 50	0,01
Verzögerungszeit	s	0,1 ... 60	0,01
Frequenzsteigerungsschutz ($f>$)			
Auslösewert	Hz	50 ... 53	0,01
Verzögerungszeit	s	0,1 ... 60	0,01
Frequenzsteigerungsschutz ($f>>$)			
Auslösewert	Hz	50 ... 53	0,01
Verzögerungszeit	s	0,1 ... 60	0,01

Tabelle 10: Einstellbereiche und Schrittweiten der einheitenbezogenen Spannungs- und Frequenzschutzfunktionen der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
 (Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

Abschnitt F: Wirk- und Blindleistungsregelung der EZE

F.1 Wirkleistungsgradienten

Die EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS können in bestimmten Betriebszuständen ihre Wirkleistung mit einstellbaren Gradienten gemäß Tabelle 12 steigern oder senken. Der Parameter „Wirkleistungsgradient im schallreduzierten Betrieb“ ist beim Übergang vom schallreduzierten Betriebsmodus zum Normalbetrieb aktiv.

Parameter	Einstellbereich	Schrittweite	Defaultwert
Positive Wirkleistungsgradienten			
Bei Normalstart	0,01% P_{rE}/s ... 10% P_{rE}/s	5% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Nach Netzausfall	0,01% P_{rE}/s ... 10% P_{rE}/s	2% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Schallreduzierter Betrieb	0,01% P_{rE}/s ... 25% P_{rE}/s	7% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Nach Frequenzevent	0,01% P_{rE}/s ... 30% P_{rE}/s	10% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Negative Wirkleistungsgradienten			
Stoppschalter	0,6% P_{rE}/s ... 33% P_{rE}/s	33% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Externer Stopp	0,1% P_{rE}/s ... 10% P_{rE}/s	5% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s
Schallreduzierter Betrieb	0,01% P_{rE}/s ... 25% P_{rE}/s	7% P_{rE}/s	0,01% P_{rE}/s

Tabelle 12: Wirkleistungsgradienten der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
 (Quelle: Herstellererklärung D03046307/0.0-de [8], D03046306/0.0-de [11], D03046305/0.0-de [9], D03046304/0.0-de [10])

F.2 Wirkleistungsanpassung in Abhängigkeit der Netzfrequenz

Die Realisierung der Wirkleistungsanpassung in Abhängigkeit der Netzfrequenz, inklusive der Fähigkeit zur Bereitstellung von Primärregelleistung, erfolgt über den EZA-Regler ENERCON FCU E2, der in jeder EZA mit EZE des Typs ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS vorzusehen ist. Mit dem Komponentenzertifikat FGH-K-2019-001-2 [13] wird bestätigt, dass bei entsprechender Software-Einstellung die in VDE-AR-N 4110/20/30 enthaltenen Anforderungen an die Wirkleistungsanpassung in Abhängigkeit der Netzfrequenz erfüllt werden.

Der Hersteller bestätigt für die EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS Fähigkeiten zur dynamischen Wirkleistungsanpassung bei Frequenzänderungen mindestens in einem Umfang, der das Erreichen von An- und Einschwingzeiten entsprechend VDE-AR-N 4110/20/30, Tabelle 9, bzw. entsprechend den eingeschränkten Anforderungen aufgrund technischer Restriktionen bei Windenergieanlagen ermöglicht.

F.3 Blindleistungsregelung

Die Sollwertvorgabe für die von der EZE bereitzustellende Blindleistung sowie die Realisierung der nach VDE-AR-N 4110/20/30 geforderten Verfahren zur Blindleistungsbereitstellung erfolgt über den EZA-Regler ENERCON FCU E2, der nach Herstellerangaben in jeder EZA mit EZE des Typs ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS vorzusehen ist.

Das Regelverhalten und die Genauigkeit der Blindleistungsregelung am NAP wird grundsätzlich durch den EZA-Regler ENERCON FCU E2 bestimmt. Mit dem Komponentenzertifikat FGH-K-2019-001-2 [13] wird bestätigt, dass bei entsprechender Software-Einstellung die in VDE-AR-N 4110/20/30 enthaltenen Anforderungen an die Blindleistungsregelung erfüllt werden.

Nachdem die EZE einen neuen Blindleistungssollwert erhalten hat, erfolgt die Änderung der Blindleistung in Normalbetrieb linear gemäß Abbildung 9.

Der neue Blindleistungssollwert wird innerhalb der Zykluszeit der Sollwertvorgabe angefahren. Die Zykluszeit ist die Zeit, die zwischen dem Empfang des aktuellen und des vorherigen Sollwerts vergangen ist. Sie ist nicht einstellbar und hängt von mehreren Faktoren ab, wie z. B. Verzögerungszeiten bei der Kommunikation von einem Windparkregler zur EZE. Die benötigte Zeit zum Erreichen des neuen Sollwerts ist somit abhängig von dem Zeitpunkt des vorher empfangenen Sollwerts. Sie beträgt maximal 100 ms und minimal 10 ms. Liegt die vorherige Sollwertvorgabe mehr als 100 ms zurück, wird die Zykluszeit auf den Wert 100 ms gesetzt. Dadurch erreicht der Blindleistungsistwert den aktuellen Sollwert nach spätestens 100 ms (vgl. Tabelle 13).

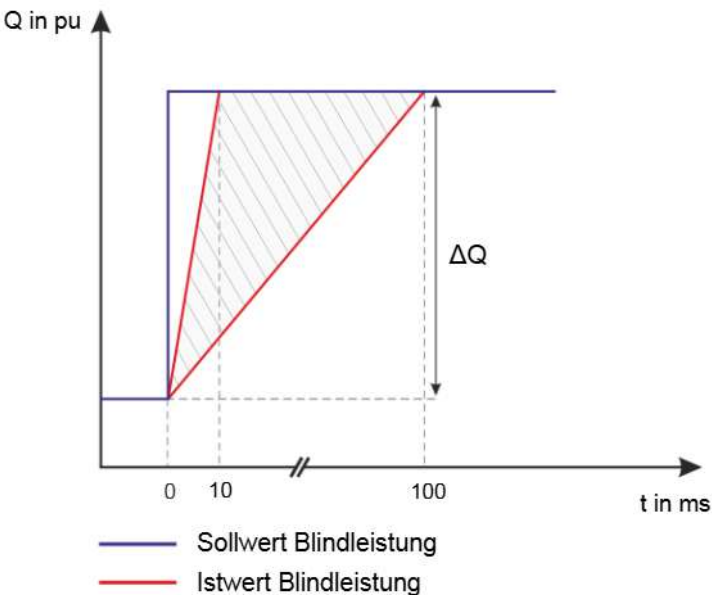


Abbildung 9: Blindleistungsgradient der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
(Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

Dauer bis zum Erreichen des neuen Q-Sollwerts	Zykluszeit in Normalbetrieb
Maximalwert	100 ms
Minimalwert ¹⁾	10 ms

Tabelle 13: Einstellbarkeit des Blindleistungsgradienten der EZE ENERCON E-175 EP5 E2 FT/FTS/FTQ/FTQS
¹⁾Umsetzbarkeit entsprechend der Zykluszeit der Sollwertänderung
(Quelle: Herstellererklärung D02731630/2.0-de [5])

Literaturverzeichnis

- [1] VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V. „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Hochspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Hochspannung)“, Dokument: VDE-AR-N 4120:2018-11. VDE e.V., November 2018.
- [2] VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V. „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Höchstspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Höchstspannung)“, Dokument: VDE-AR-N 4130:2018-11. VDE e.V., November 2018.
- [3] VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V. „Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Mittelspannung)“, Dokument: VDE-AR-N 4110:2023-09. VDE e.V., September 2023.
- [4] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt - Netztechnische Leistungsmerkmale FACTS 2.0 ENERCON Control System PI-CS (EP5)“, Dokument D02731630/2.0. ENERCON GmbH, 22. September 2022.
- [5] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt Netztechnische Leistungsmerkmale FACTS 2.0 ENERCON Control System PI-CS (EP5)“, Dokument D02731630/2.0-de. ENERCON GmbH, 22. September 2022.
- [6] WRD GmbH. „Herstellererklärung Erklärung zur Prototypenbestätigung E-175 EP5 E2“, Dokument D03053855/0.0. ENERCON GmbH, 31. Juli 2024.
- [7] WRD GmbH. „Technische Beschreibung Betriebsstrategien FACTS 2.0 ENERCON Platform Independent Control System (PI-CS)“, Dokument D03033350/0.1-de. ENERCON GmbH, 01. Juli 2024.
- [8] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt Netztechnische Leistungsmerkmale ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 E2 / 7000 kW / FT“, Dokument D03046307/0.0-de. ENERCON GmbH, 10. Juli 2024.
- [9] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt Netztechnische Leistungsmerkmale ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 E2 / 7000 kW / FTQ“, Dokument D03046305/0.0-de. ENERCON GmbH, 10. Juli 2024.
- [10] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt Netztechnische Leistungsmerkmale ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 E2 / 7000 kW / FTQS“, Dokument D03046304/0.0-de. ENERCON GmbH, 10. Juli 2024.
- [11] WRD GmbH. „Technisches Datenblatt Netztechnische Leistungsmerkmale ENERCON Windenergieanlage E-175 EP5 E2 / 7000 kW / FTS“, Dokument D03046306/0.0-de. ENERCON GmbH, 10. Juli 2024.
- [12] Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien (FGW) e.V. Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und -anlagen, Teil 3: Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen, Speicher sowie für deren Komponenten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, Revision 25. FGW e.V., 01. September 2018.

- [13] FGH Zertifizierungsstelle. „Komponentenzertifikat FGH-K-2019-001-2“, EZA-Regler ENERCON FCU E2. FGH Zertifizierungsstelle, 29. April 2022.