

Diskussion dynamischer und stationärer Spannungsstabilitätsuntersuchungen bei volatilen Übertragungsaufgaben

- Hintergrund und Motivation
- Analyse
- Modelle und Verfahren
- Exemplarische Untersuchungen
- Zusammenfassung

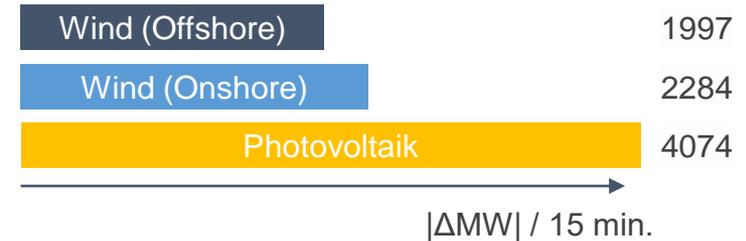
Moritz Maercks

Graz, 15. Februar 2018

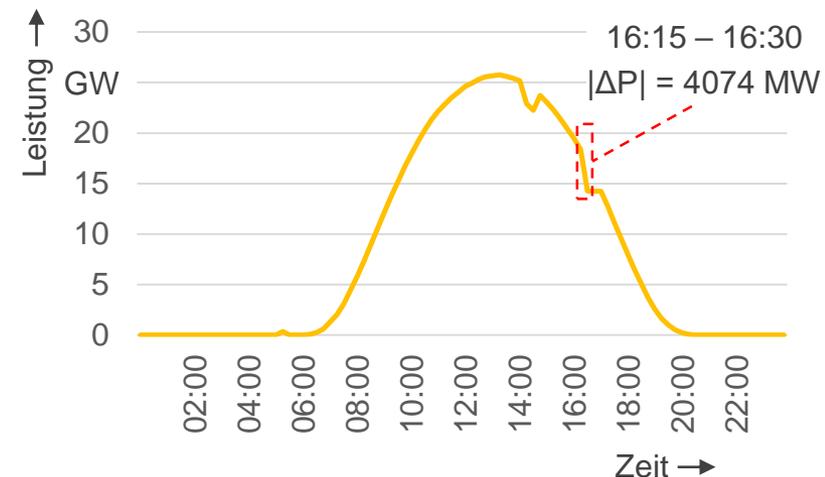
Hintergrund und Motivation

- Vermehrte dargebotsabhängige Erzeugung führt zu
 - ◆ erhöhter Volatilität zu transportierender Leistung,
 - ◆ erhöhtem und volatilerem Blindleistungsbedarf in Verteilnetzen sowie
 - ◆ Situationen mit wenig konv. Kraftwerken im Betrieb.
- ➔ Herausforderungen für Netzbetreiber
 - ◆ Erhöhter und zunehmend volatiler Blindleistungsbedarf des Übertragungsnetzes
 - ◆ Zunehmende Bedeutung des Einsatzes von Kompensationsanlagen
 - ◆ Erhöhte Auslastung des Netzes bedeutet Betrieb näher an Spannungsstabilitätsgrenze
 - ◆ Spannungshaltung in stark ausgelastetem Netz bei volatiler Netznutzung zu gewährleisten
- ➔ Volatile Netzbelastung bedeutet zunehmende Relevanz von Wechselwirkungen im Zeitbereich
- Wie beeinflusst das Zusammenwirken von volatiler Einspeisung, Lasterholung und dezentralen Regelungen Spannungsstabilitätsuntersuchungen?

Maximale Einspeisegradien dargebotsabhängiger Erzeuger 2016¹



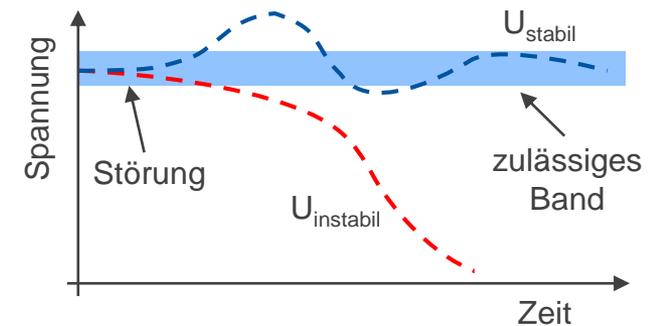
PV-Einspeisung am 24.08.16¹



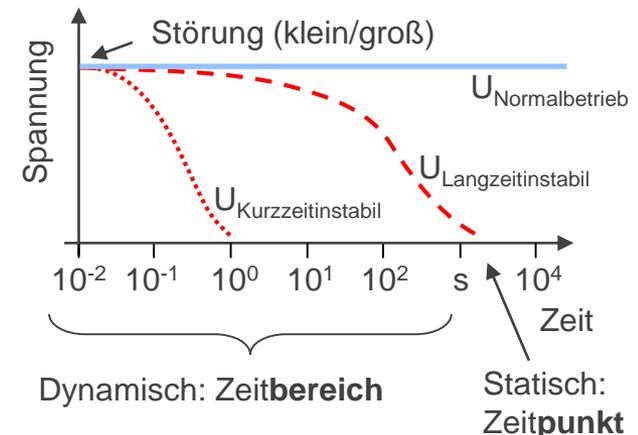
Spannungsstabilität in Elektrizitätsversorgungssystemen

- Spannungsstabilität eines Elektrizitätsversorgungssystems bezeichnet dessen Fähigkeit, Grenzen der Betriebsspannungen einzuhalten
 - ◆ Untersuchung der Auswirkungen von Störungen
 - ◆ Technisch determinierte Grenzen dürfen *vorübergehend* verletzt sein
 - ◆ Stabilität gegeben, wenn Grenzen *nach gewisser Zeit* eingehalten werden
- Klassifizierung von Spannungsstabilität
 - ◆ Art der Störung: Groß- oder Kleinsignalstörung
 - ◆ Betrachteter Zeithorizont: Kurz, Mittel, Lang
 - ◆ **Berücksichtigung dynamischer Prozesse**
- Zeitpunkt Betrachtung
 - ◆ Vereinfachte Berücksichtigung zeitlicher Abhängigkeiten durch umfangreiche Zeitreihensimulation
- Zeitbereichsbetrachtung
 - ◆ Umfangreiche Berücksichtigung dynamischer Wechselwirkungen aufgrund des Zusammenwirkens von Last-/Einspeiseänderungen, Regelungen und Schutzsystemen

(In)stabiler Spannungsverlauf



Einordnung in den Zeitbereich



kurz mittel lang

Kurzschlüsse, Leistungselektronik, ... Last-/Einspeiseänderungen, Transformatorstufungen, Überstromschutzsysteme...

Modelle und Verfahren

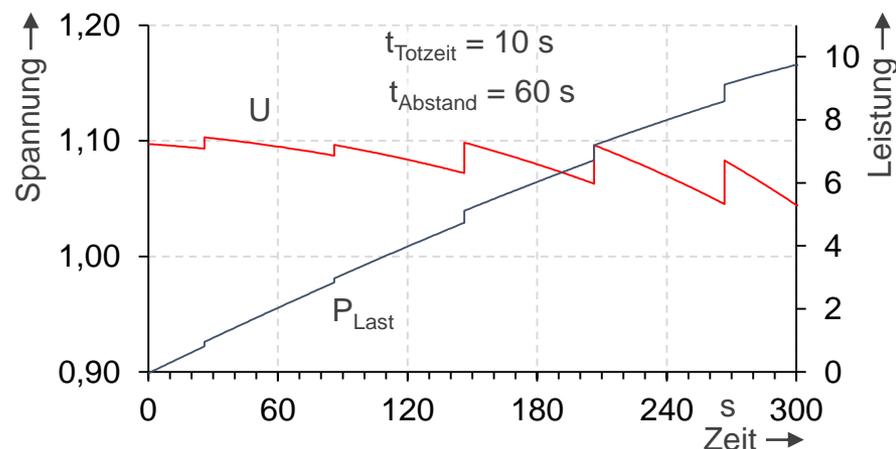
Modelle

- π -Ersatzschaltbilder der Komponenten
- Transformator mit automatischer Stufung
 - ◆ $\ddot{u}(t, U) = \ddot{u}_{Basis} \pm 0,1 \text{ bis } 0,2$
 - ◆ Regelung auf OS- bzw. US-Sollspannung
 - ◆ Stufung bei Überschreiten der Sollspannung um $\pm \Delta U_{Totband}$ für $t_{Totzeit}$
 - ◆ Mindestzeit $t_{Abstand}$ zwischen Stufungen
- Verbrauchermodell
 - ◆ Typ 0: spannungsunabhängig
 - ◆ Typ 1: spannungsabhängig
 - ◆ Typ 2: spannungsabhängig mit Lasterholung

Verfahren

- Aufstellen und numerisches Lösen des differential-algebraischen Gleichungssystems mit implizitem Integrationsverfahren
- Berücksichtigung von Ereignissen möglich (insb. Ausfälle)

Automatische Transformatorstufung bei Lasterhöhung



Spannungsabhängigkeit und Lasterholung

$$\text{Typ 1: } P_{\alpha}(P_{0,t}, U_t) = P_{0,t} \cdot \left(\frac{U_t}{U_0}\right)^{\alpha}$$

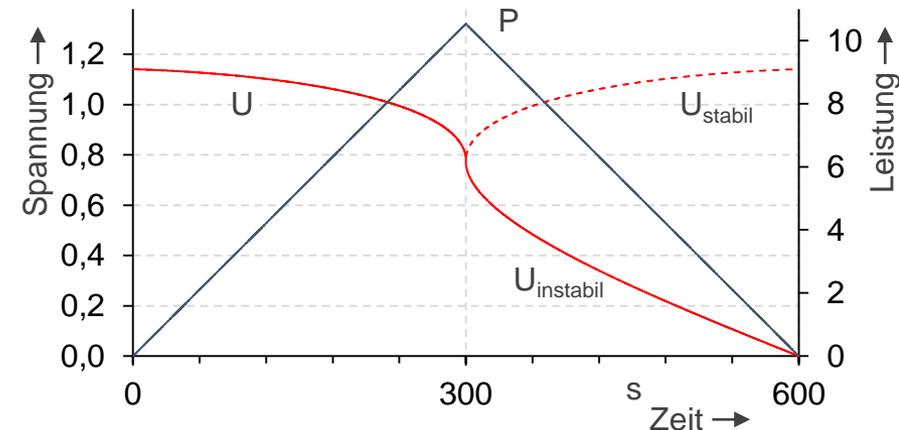
$$\text{Typ 2: } P_{\alpha_1, \alpha_2}(P_{0,t}, P_{r,t}, U_t) = P_{r,t} + P_{\alpha_1}(P_{0,t}, U_t)$$

$$T \cdot \frac{dP_{r,t}}{dt} + P_{r,t} = P_{\alpha_2}(P_{0,t}, U_t) - P_{\alpha_1}(P_{0,t}, U_t)$$

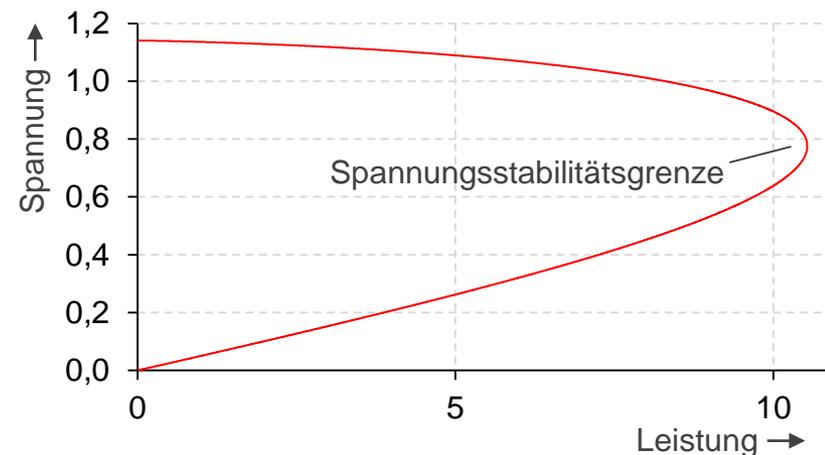
Instabiler Spannungsverlauf und Analogie zum CPF

- Versorgung einer konstanten Last bei sinkender und wieder ansteigender paralleler Einspeisung über eine Freileitung
- Parametrierung mit Residuallastmaximum kurz vor Spannungsstabilitätsgrenze
- ➔ Stabiler Spannungsverlauf
- Verfahrensanpassung zur Identifizierung der Leistungsflusslösung mit geringen Spannungen
 - ◆ Störung des Startwerts des Systemzustands, der in Newton-Raphson-Verfahren zur Lösung der Systemgleichungen verwendet wird
 - ◆ Störung der Spannung am Lastknoten um 10 % nach 300 s (kurz vor Spannungsstabilitätsgrenze)
- ➔ Verfahren identifiziert instabile Lösung der Leistungsflussgleichungen
 - ◆ Erlaubt Darstellung der sog. „Nasenkurve“
 - ◆ Üblicherweise Continuation Power Flow (CPF) zur Ermittlung des unteren, instabilen Bereichs der Nasenkurve verwendet

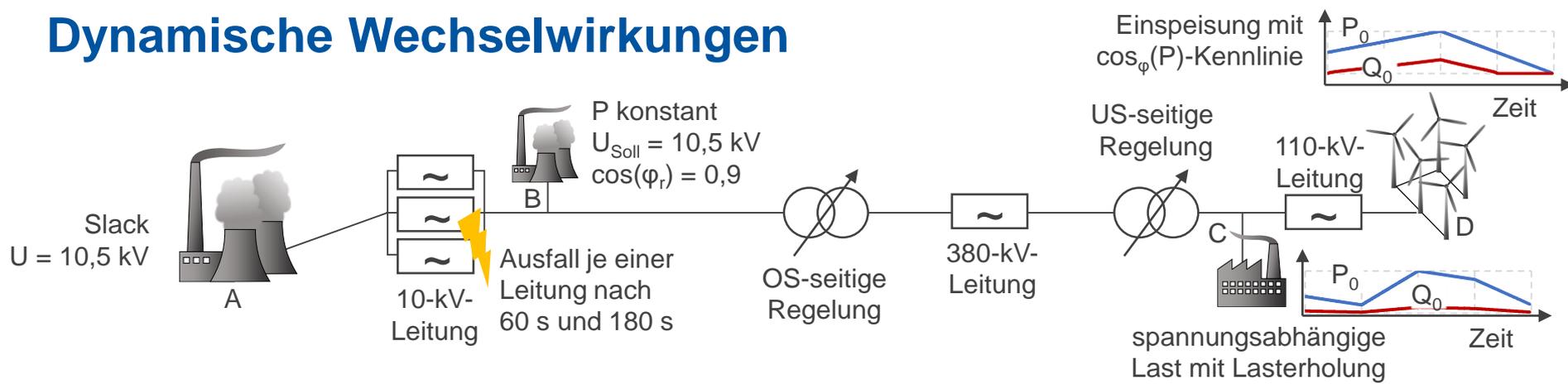
Spannungsverlauf im Zeitverlauf



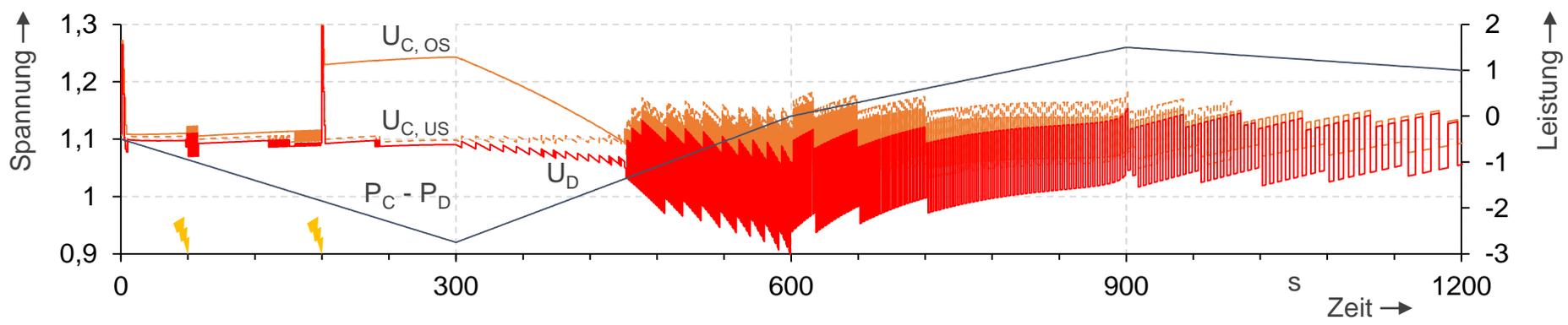
Spannung vs. Last („Nasenkurve“)



Dynamische Wechselwirkungen

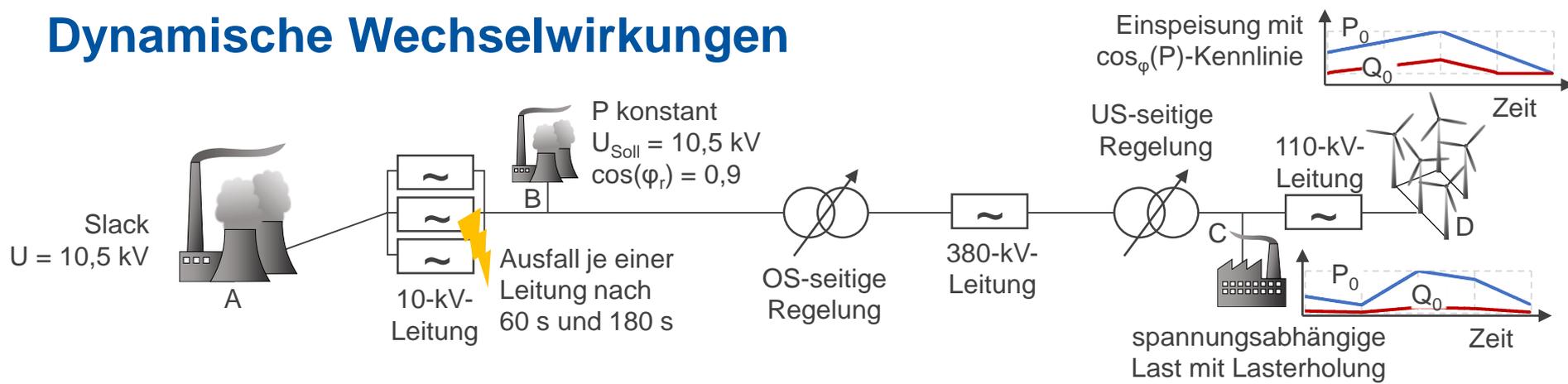


Simulationsergebnis bei stationärer Abschätzung mit spannungsunabhängiger Last

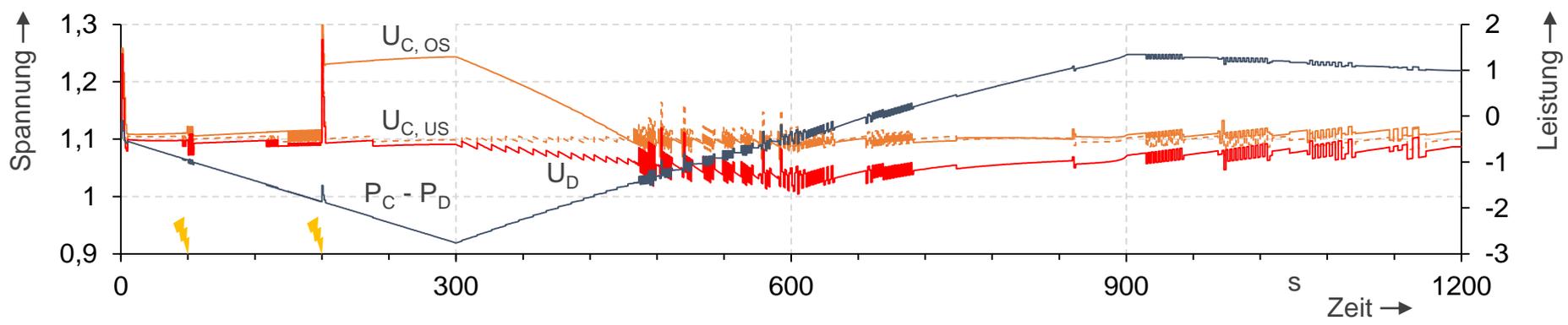


- Starke Schwingungen aufgrund gegeneinander regelnder Transformatorstufungen
- Spannungen meist auf hohem Niveau
- ➔ Stabiler Spannungsverlauf

Dynamische Wechselwirkungen

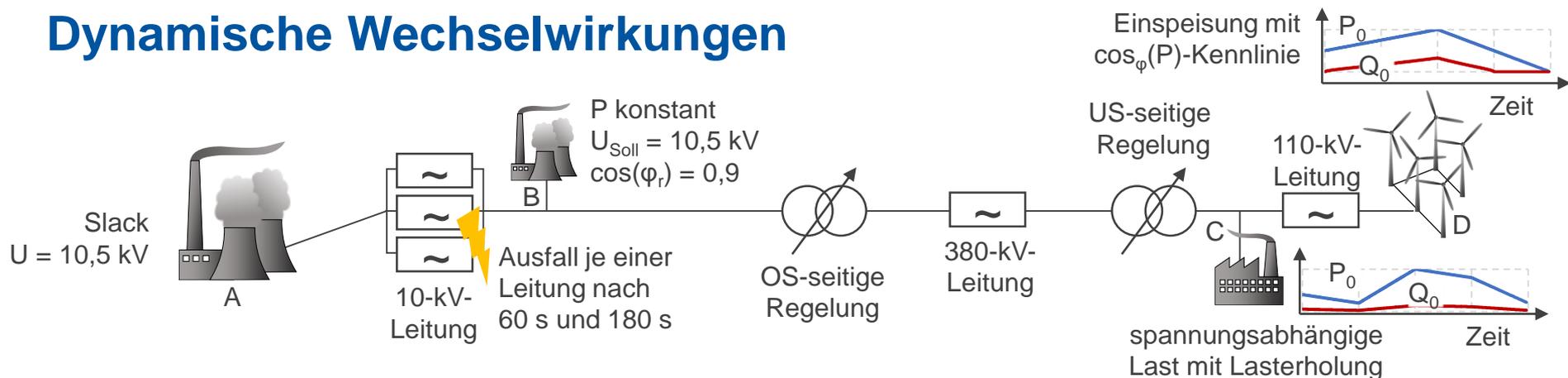


Simulationsergebnis bei stationärer Abschätzung mit spannungsabhängiger Last

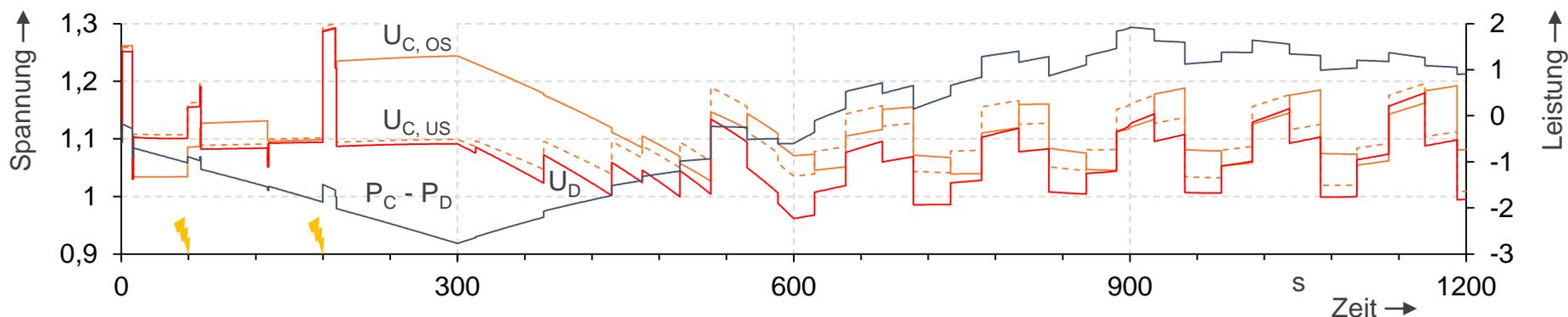


- Weniger starke Schwingungen als bei spannungsunabhängiger Last
- Ähnlicher Spannungsverlauf auf durchgehend hohem Niveau
- ➔ Stabiler Spannungsverlauf

Dynamische Wechselwirkungen

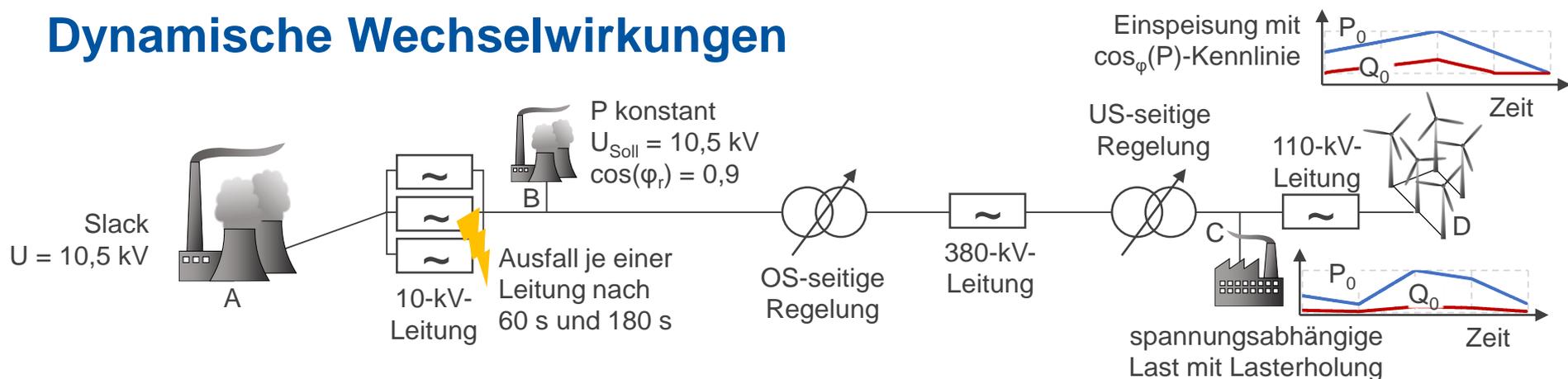


Simulationsergebnis bei Zeitbereichssimulation mit kurzen Stufungsverzögerungen und spannungsabhängiger Last mit Lasterholung

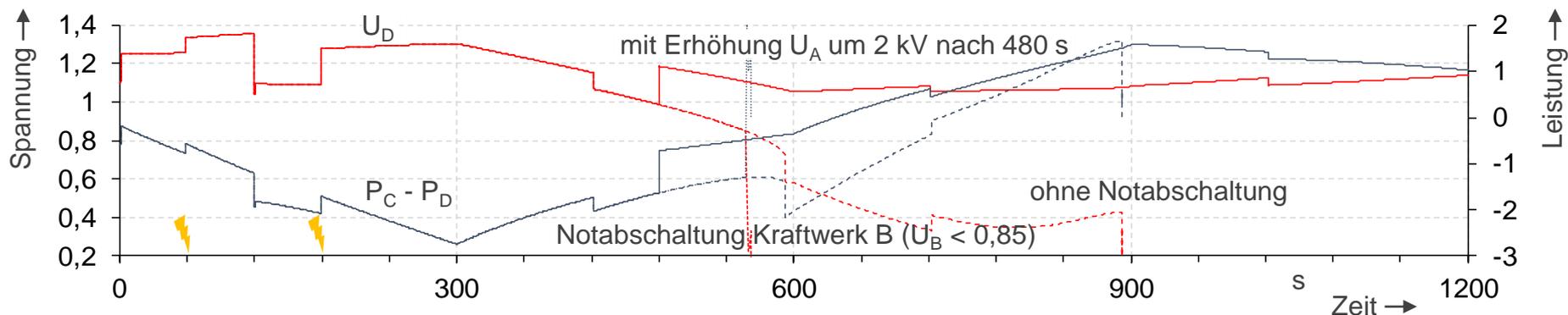


- Spannungen im Mittel mit ähnlichem Verlauf wie bei stationärer Abschätzung
- Teilweise deutliche Abweichungen hin zu höheren und niedrigeren Spannungen
- Minimale Spannung höher als bei stationärer Abschätzung mit spannungsunabhängiger Last
- ➔ Stabiler Spannungsverlauf

Dynamische Wechselwirkungen



Simulationsergebnis bei Zeitbereichssimulation mit langen Stufungsverzögerungen und spannungsabhängiger Last mit Lasterholung



- Stufungsverzögerung führt zu deutlich variiertem Spannungsverlauf
- Spannungsbedingte Generatortotabschaltung führt zu Spannungszusammenbruch
- Vernachlässigung automatischer Netztrennung zögert Spannungszusammenbruch heraus
- Spannungszusammenbruch kann durch Erhöhung der Slackspannung verhindert werden
- ➔ Instabiler Spannungsverlauf

Zusammenfassung

Hintergrund und Motivation

- Wie beeinflusst das Zusammenwirken von volatiler Einspeisung, Lasterholung und dezentralen Regelungen Spannungsstabilitätsuntersuchungen?

Analyse, Modelle und Verfahren

- Zeitpunkt- und Zeitbereichsverfahren bei Spannungsstabilitätsuntersuchungen eingesetzt
- Einfache Modelle zur Berücksichtigung dynamischer Wechselwirkungen
- Zeitbereichsverfahren zur Lösung des differential-algebraischen Gleichungssystems
- Zeitpunktverfahren durch Vernachlässigung dynamischer Wechselwirkungen

Exemplarische Untersuchungen

- Zeitbereichsberechnung erlaubt vergleichbare Ergebnisse wie Continuation Power Flow
- Wechselwirkungen dezentraler Regelungen stationär schwer abzuschätzen
- Zusammenwirken von volatiler Einspeisung, Lasterholung sowie automatischer Transformatorstufung kann zu spannungsinstabilen Situationen führen, die durch rein stationäre Abschätzung nicht identifiziert werden.