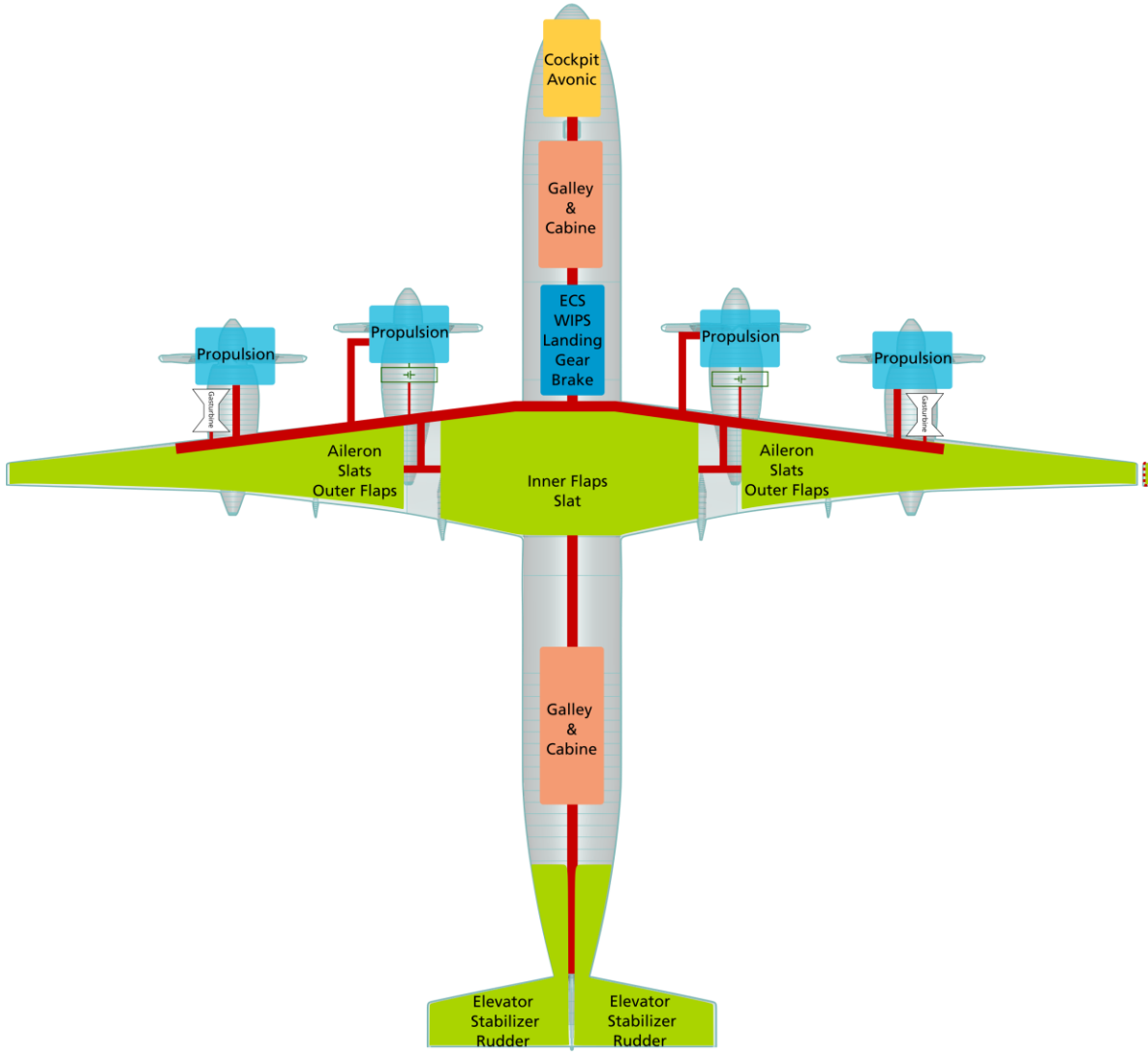
DROOP-BASIERTE LASTREGELUNG FÜR DC-BORDNETZE ELEKTRIFIZIERTER LUFTFAHRZEUGE

Andrea Reindl[1], Franciscus van der Linden[1], Peter Maximilian Müller[2]

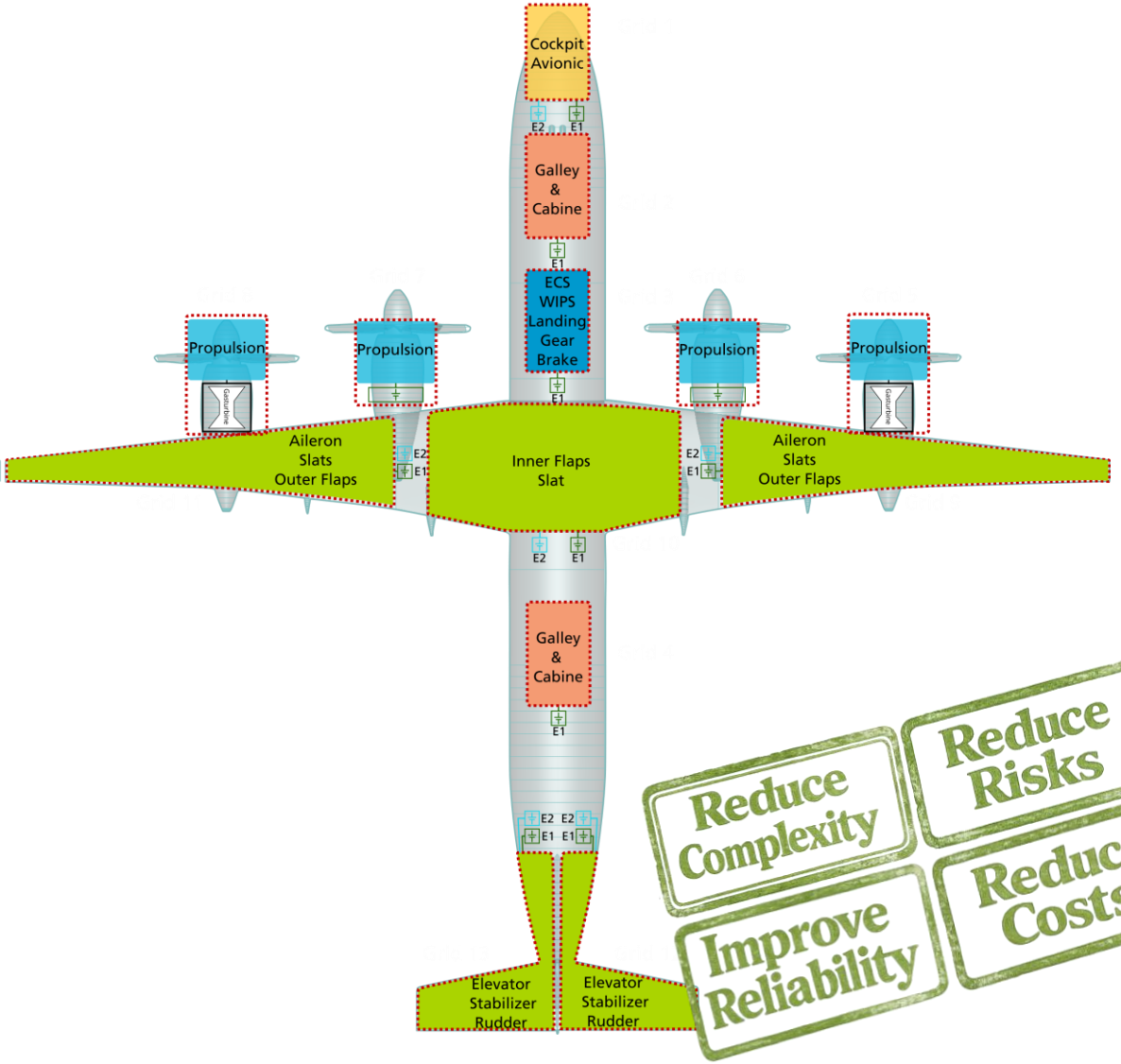
[1]Institut für Systemarchitekturen in der Luftfahrt, DLR

[2]Diehl Aerospace GmbH

Conservative Approach: Connected Grid



Disruptive Approach: Islanded Microgrids



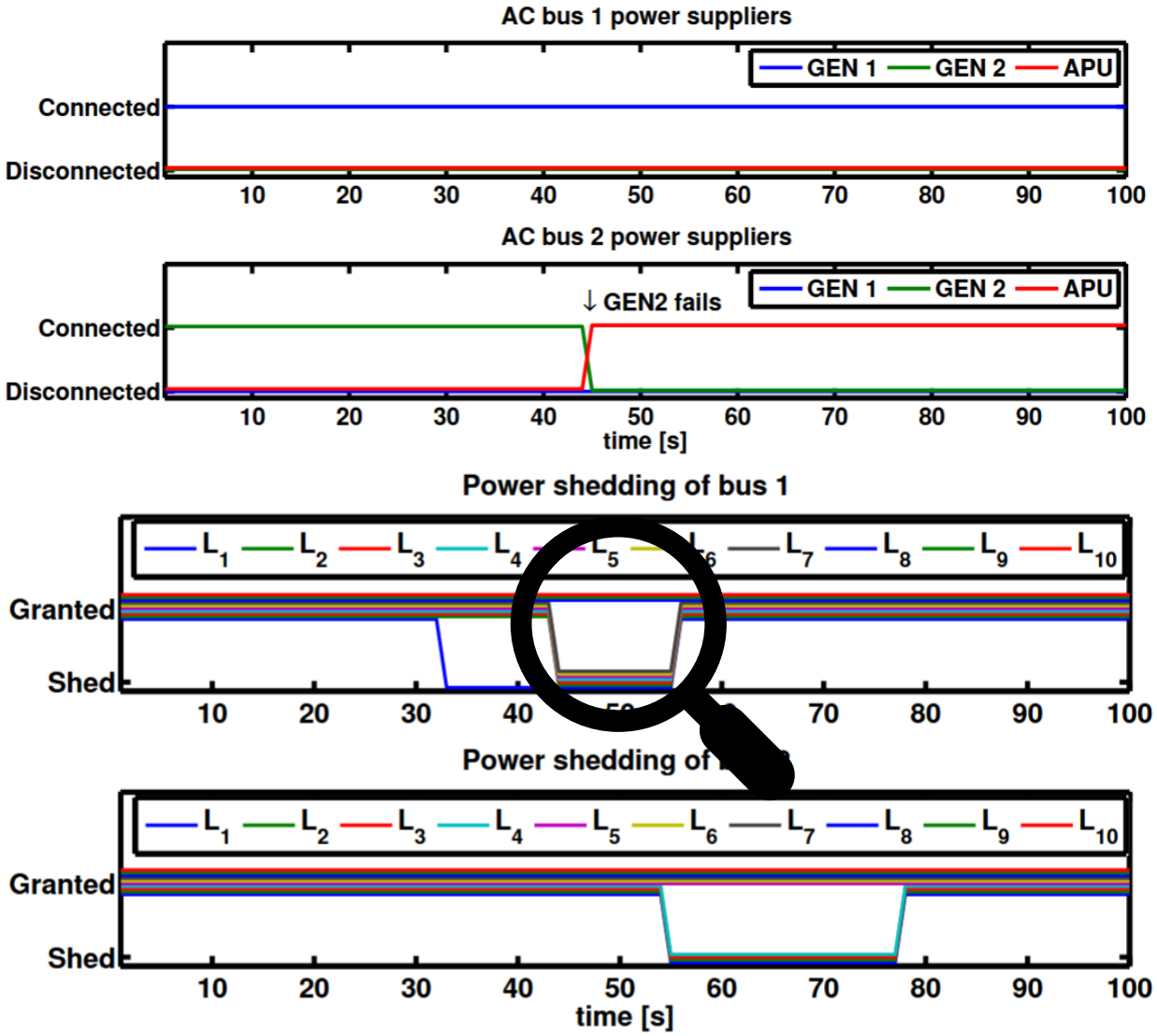
Reduce Complexity

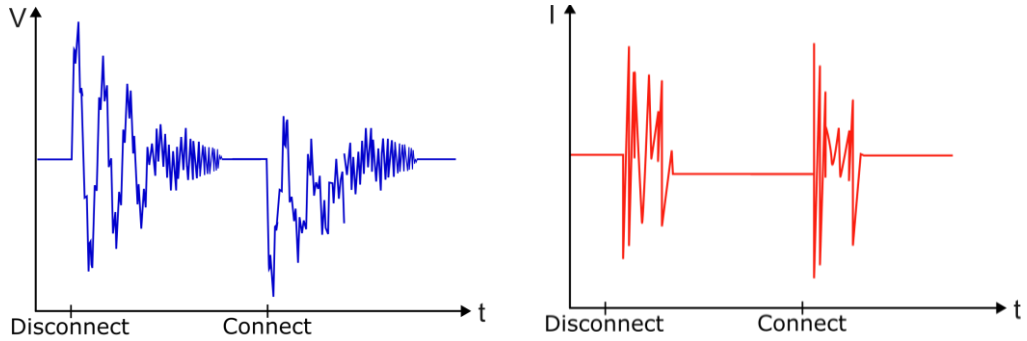
Reduce Risks

Improve Reliability

Reduce Costs

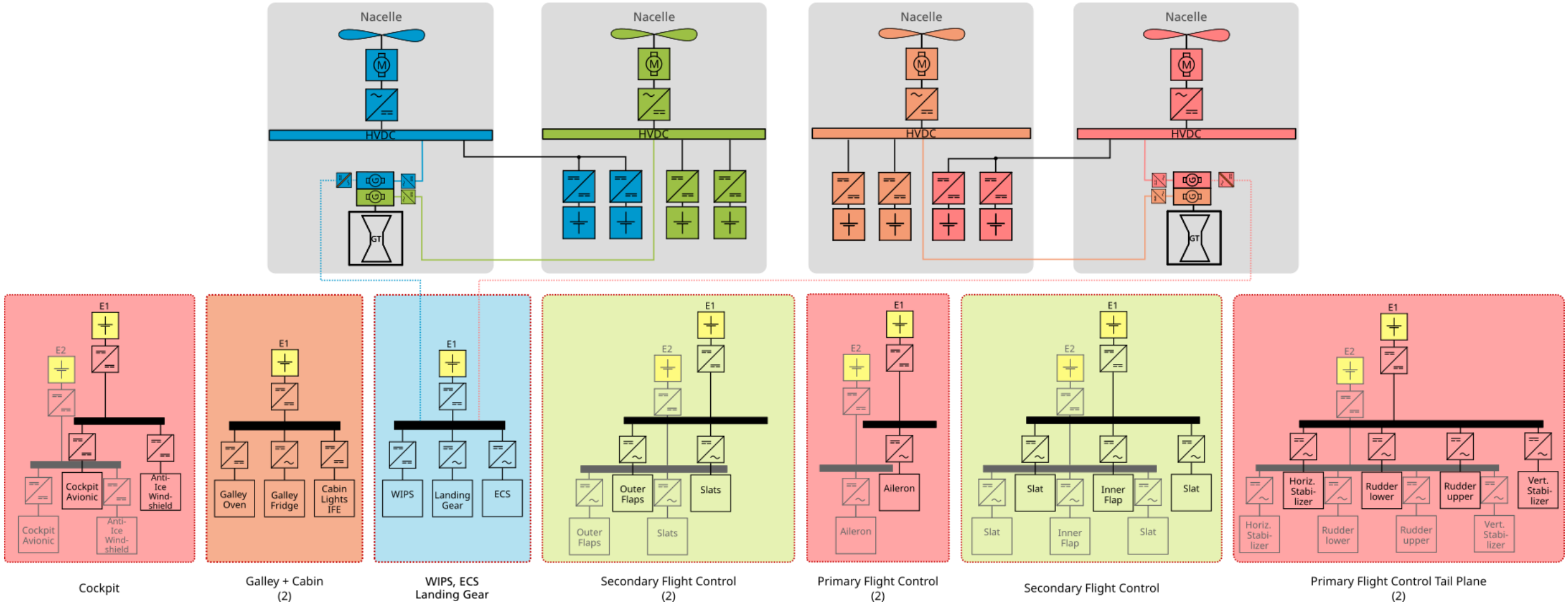
Binärer Lastabwurf



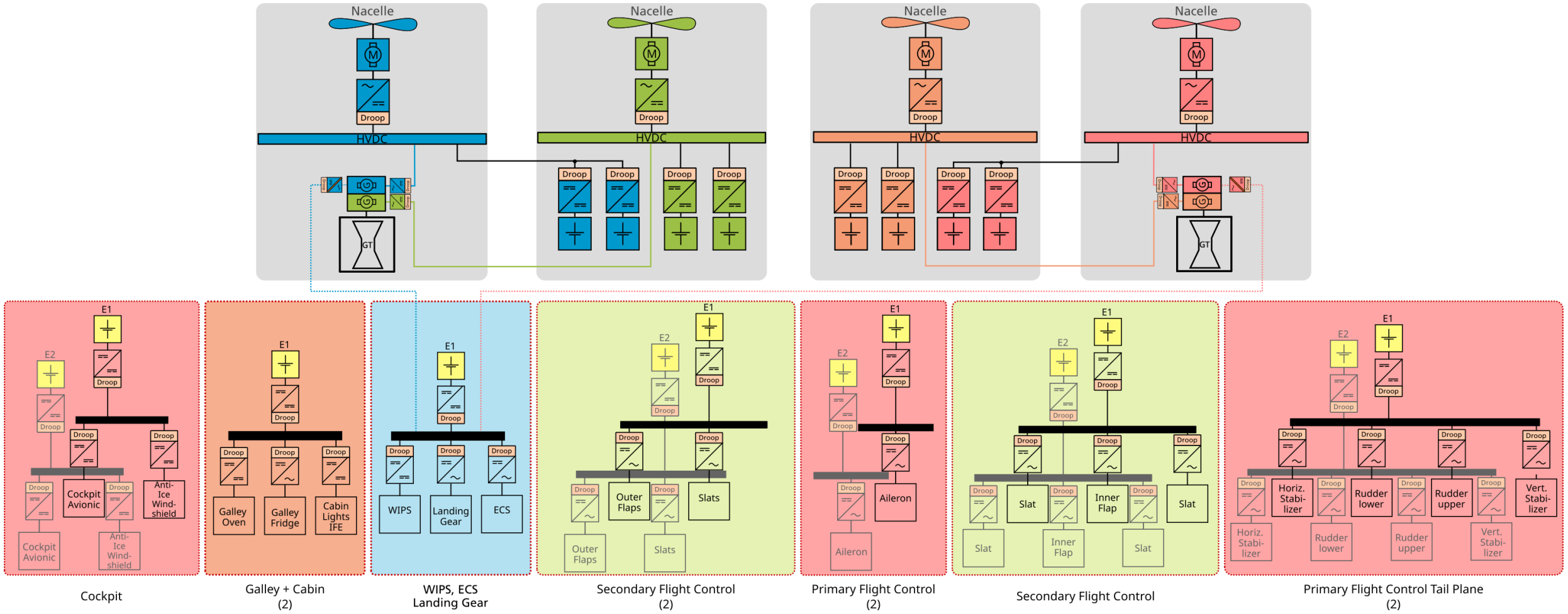


M. Maasoumy, P. Nuzzo, F. Iandola, M. Kamgarpour, A. Sangiovanni-Vincentelli and C. Tomlin, "Optimal load management system for Aircraft Electric Power distribution," *52nd IEEE Conference on Decision and Control*, Firenze, Italy, 2013, pp. 2939-2945, doi: 10.1109/CDC.2013.6760330.

DC Inselnetze

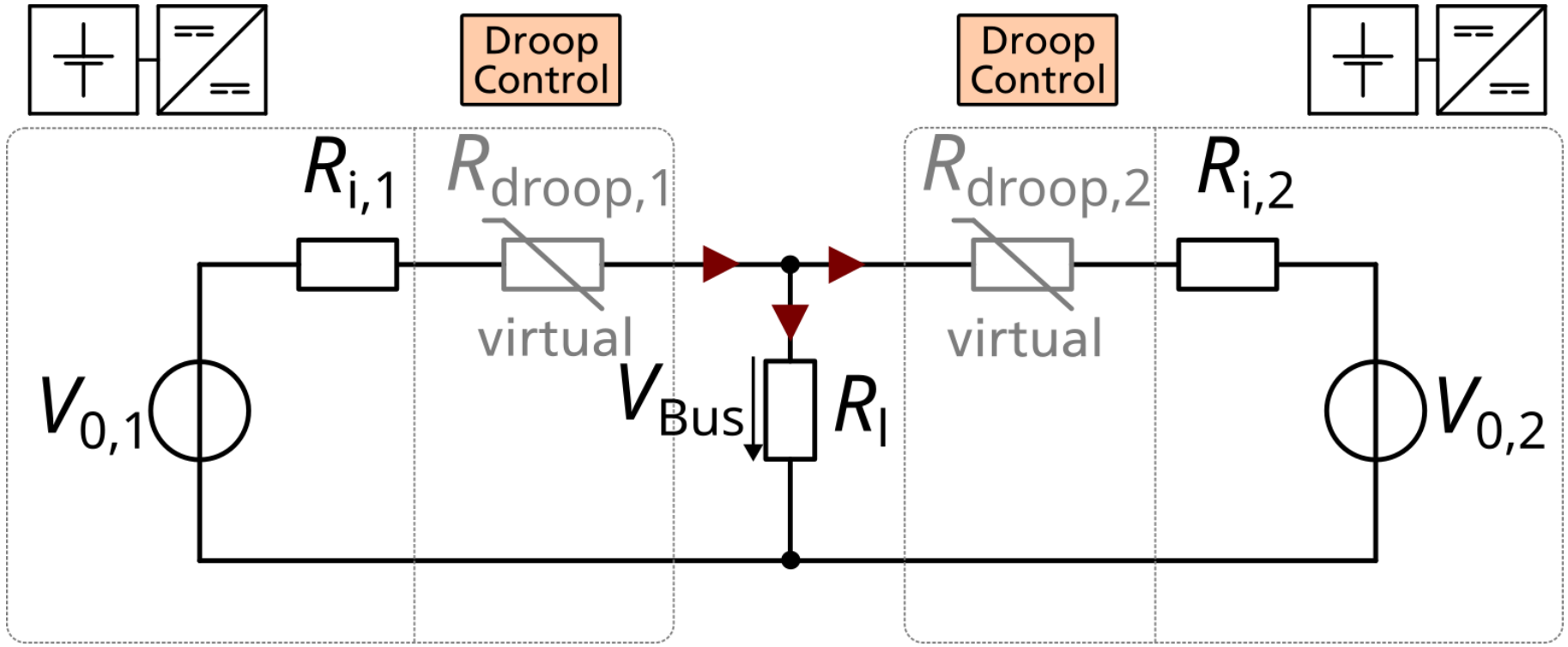


Lösungsprinzip: Droop zur Leistungsbegrenzung und zur Lastaufteilung zwischen parallel verschaltete Erzeuger



Droop-Regelung Erzeugungsseite

$$V_i^* = V_{0,i} - R_{droop,i} \cdot I_i$$



$$V_{Bus} = V_{DC/DC1} - (R_{i1} + R_{droop1}) \cdot I_1$$

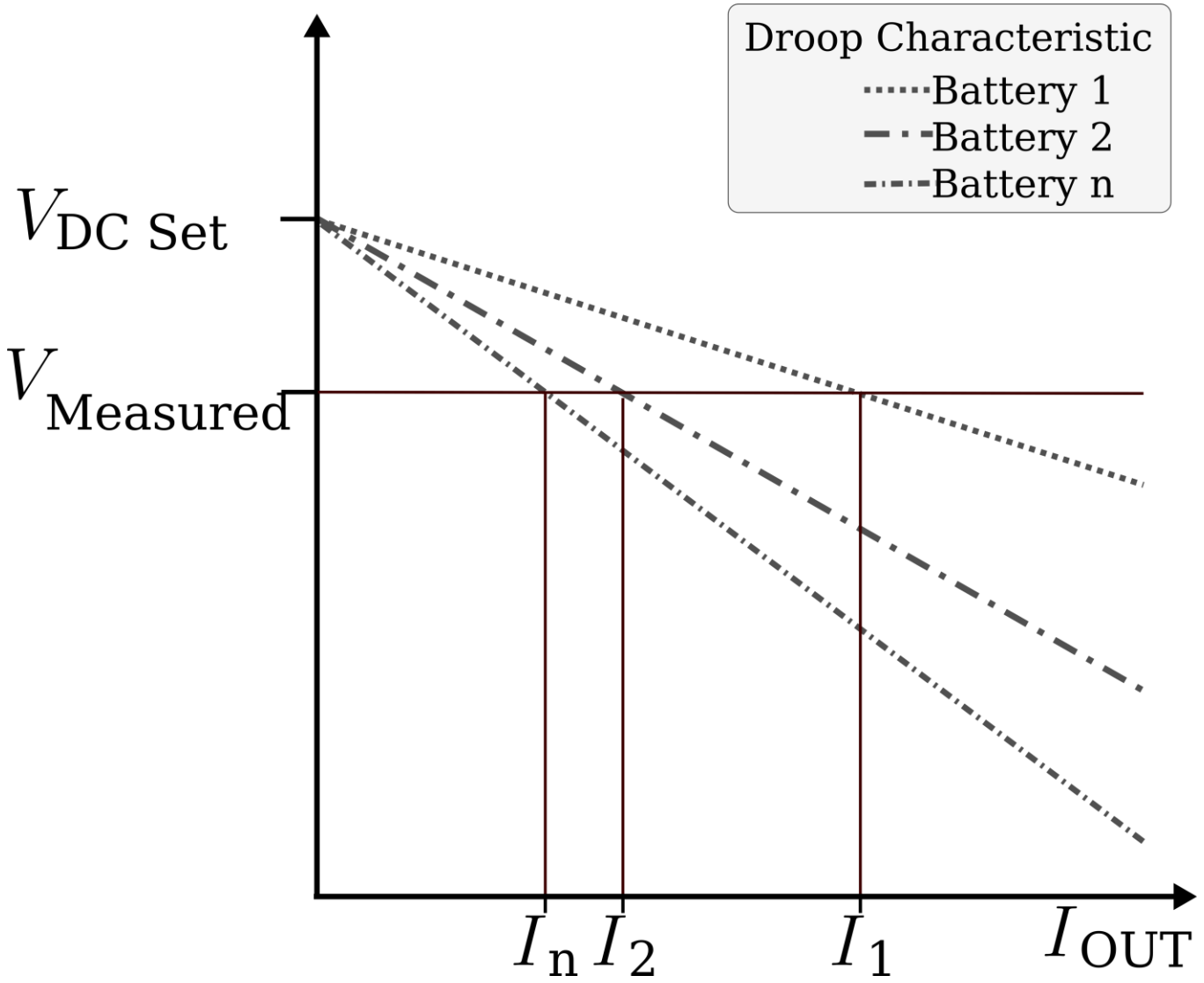
$$V_{Bus} = V_{DC/DC2} - (R_{i2} + R_{droop2}) \cdot I_2$$

$$I_{Bus} = I_1 + I_2$$

Für $V_{DC/DC1} = V_{DC/DC2}$ folgt:

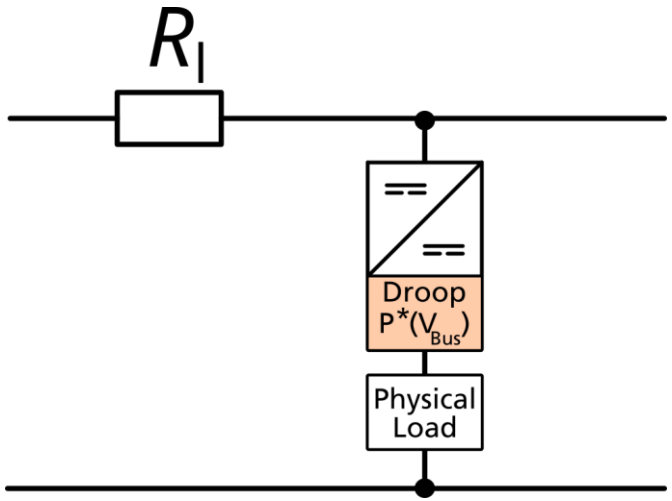
$$I_1 = \frac{R_{i2} + R_{droop2}}{R_{i1} + R_{droop1}} \cdot I_2$$

Droop-Regelung Erzeugungsseite



Droop Regelung Lastseite

Constant Power Load mit Droop Regelung



$$P^*_{L,stat} = P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)$$

Für $k_L > 0$ gilt:

$$V_{Bus} \downarrow \Rightarrow P^*_L \downarrow$$

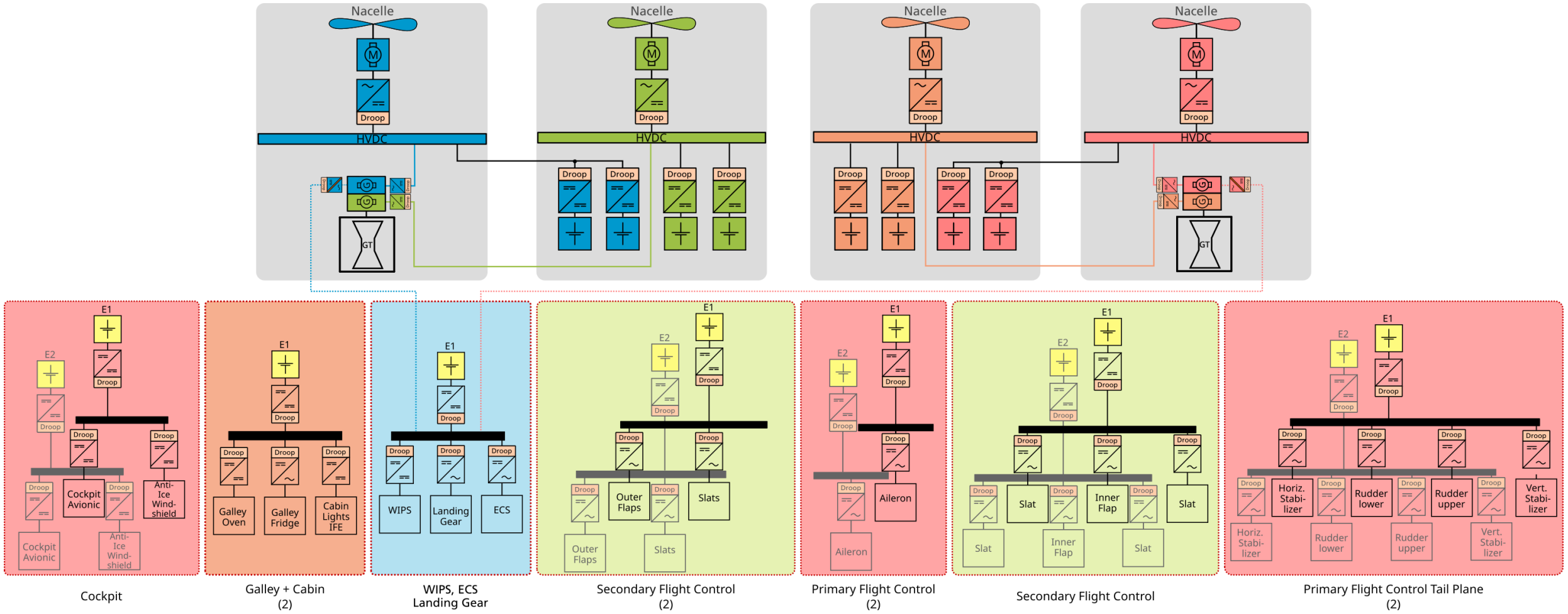
Mit Begrenzung:

$$P^*_{L,stat} = sat_{[P_{min},P_{max}]}[P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)]$$

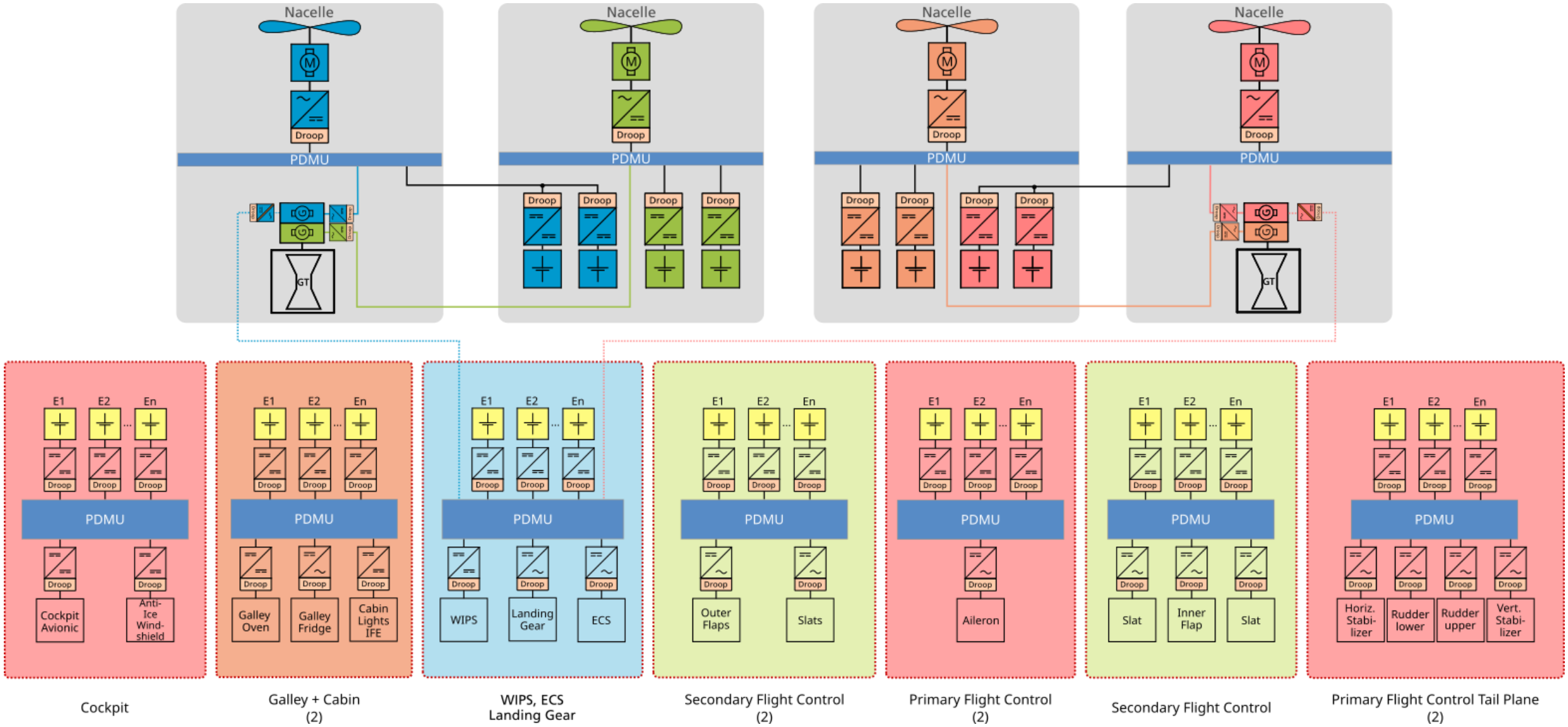
Stromsollwert des Konverters:

$$I^*_L = \frac{P^*_{L,stat}}{V_{Bus}} = \frac{P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)}{V_{Bus}}$$

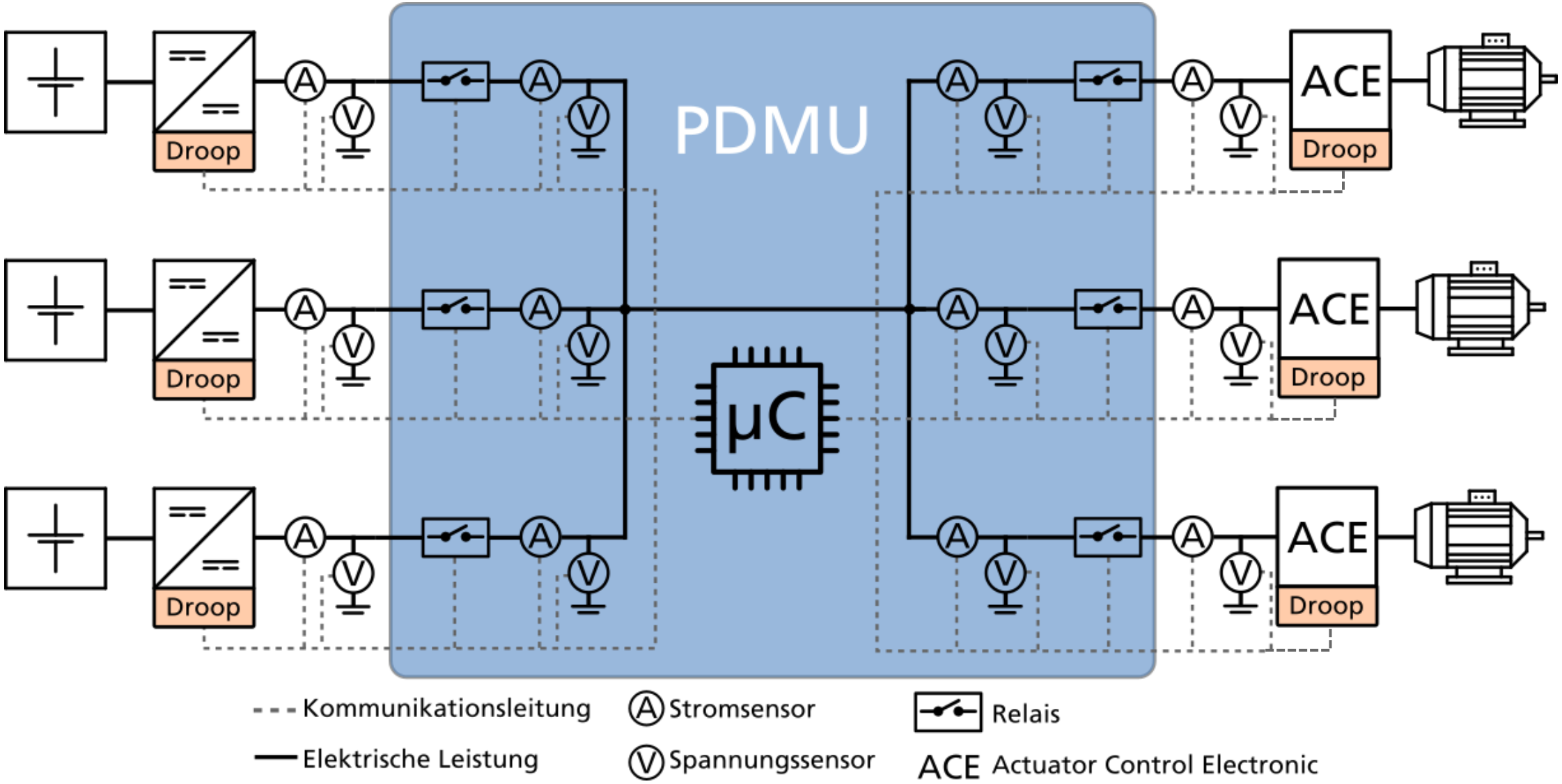
Lösungsprinzip: Droop zur Leistungsbegrenzung und zur Lastaufteilung zwischen parallel verschaltete Erzeuger



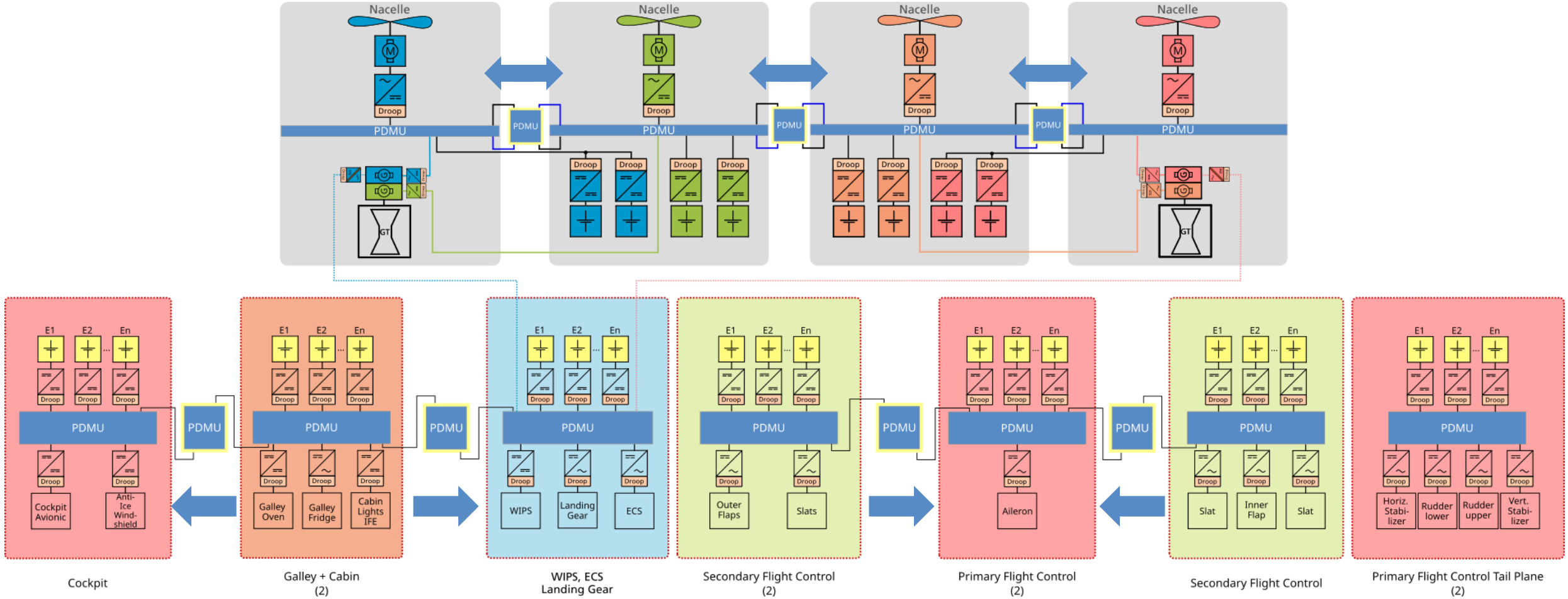
Neuartige Architektur: PDMU + Droop auf Erzeugungs- und Lastseite



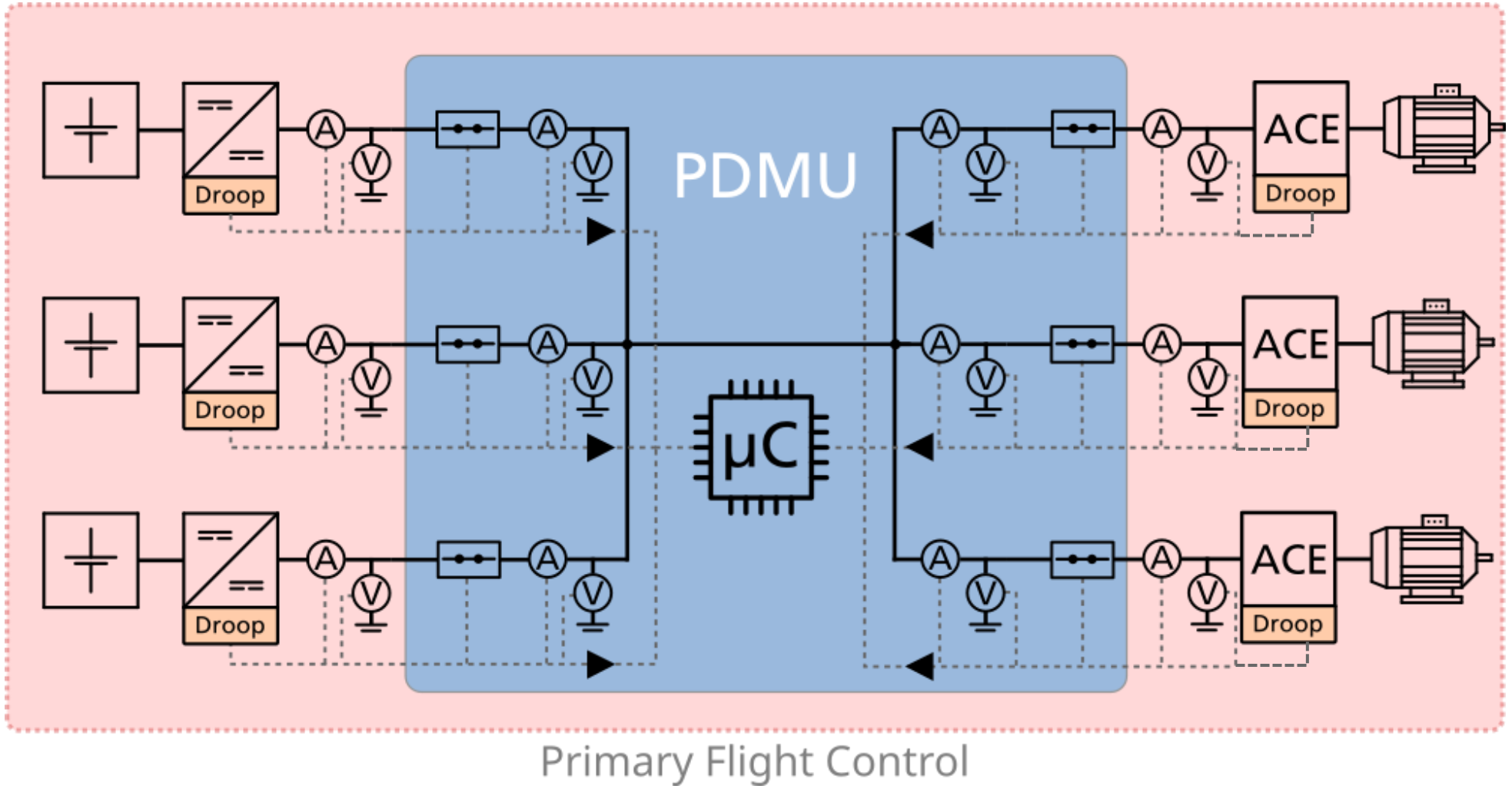
Power Distribution Management Unit



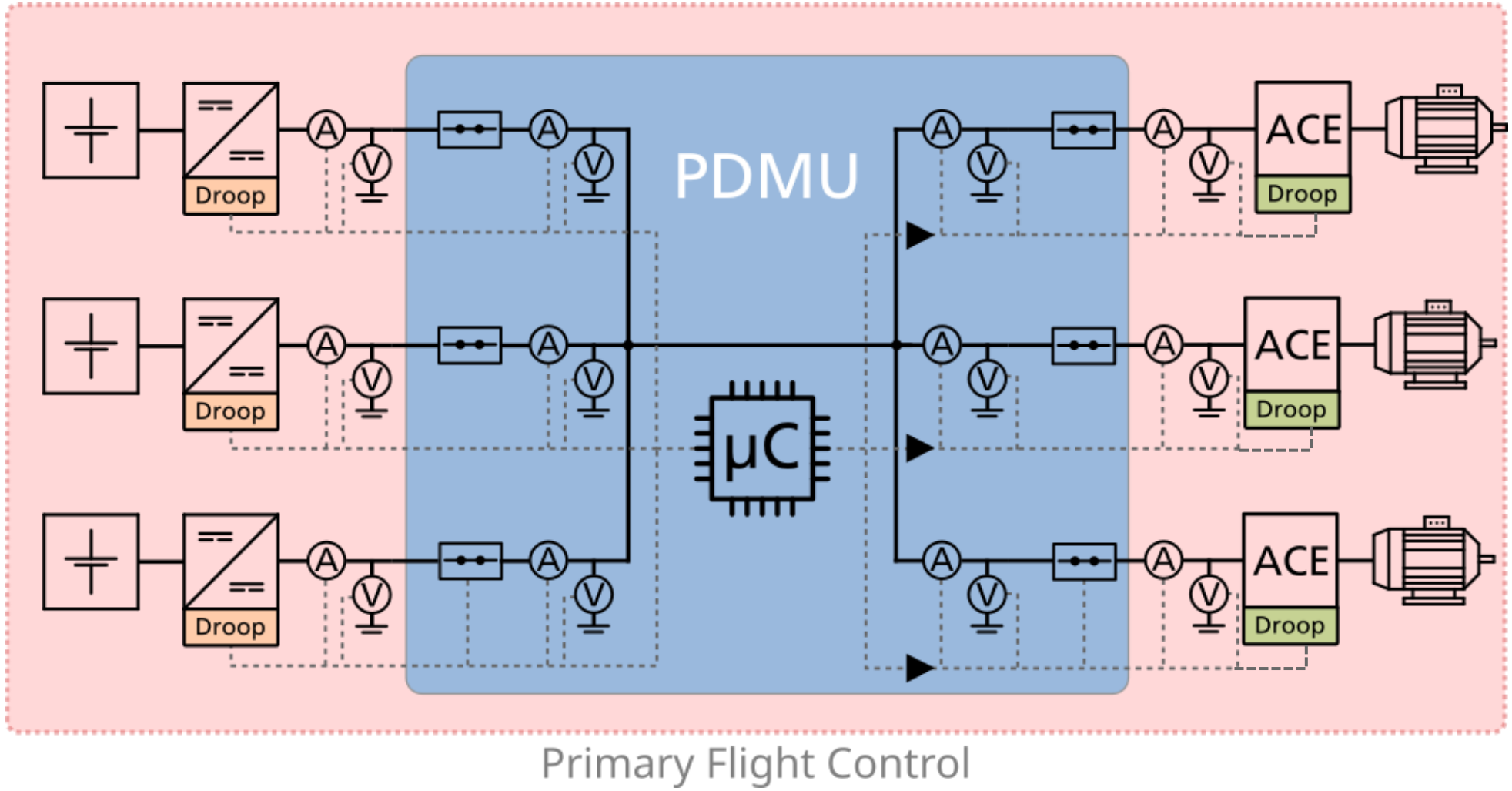
Inter-Grid-PDMUs für Rekonfiguration



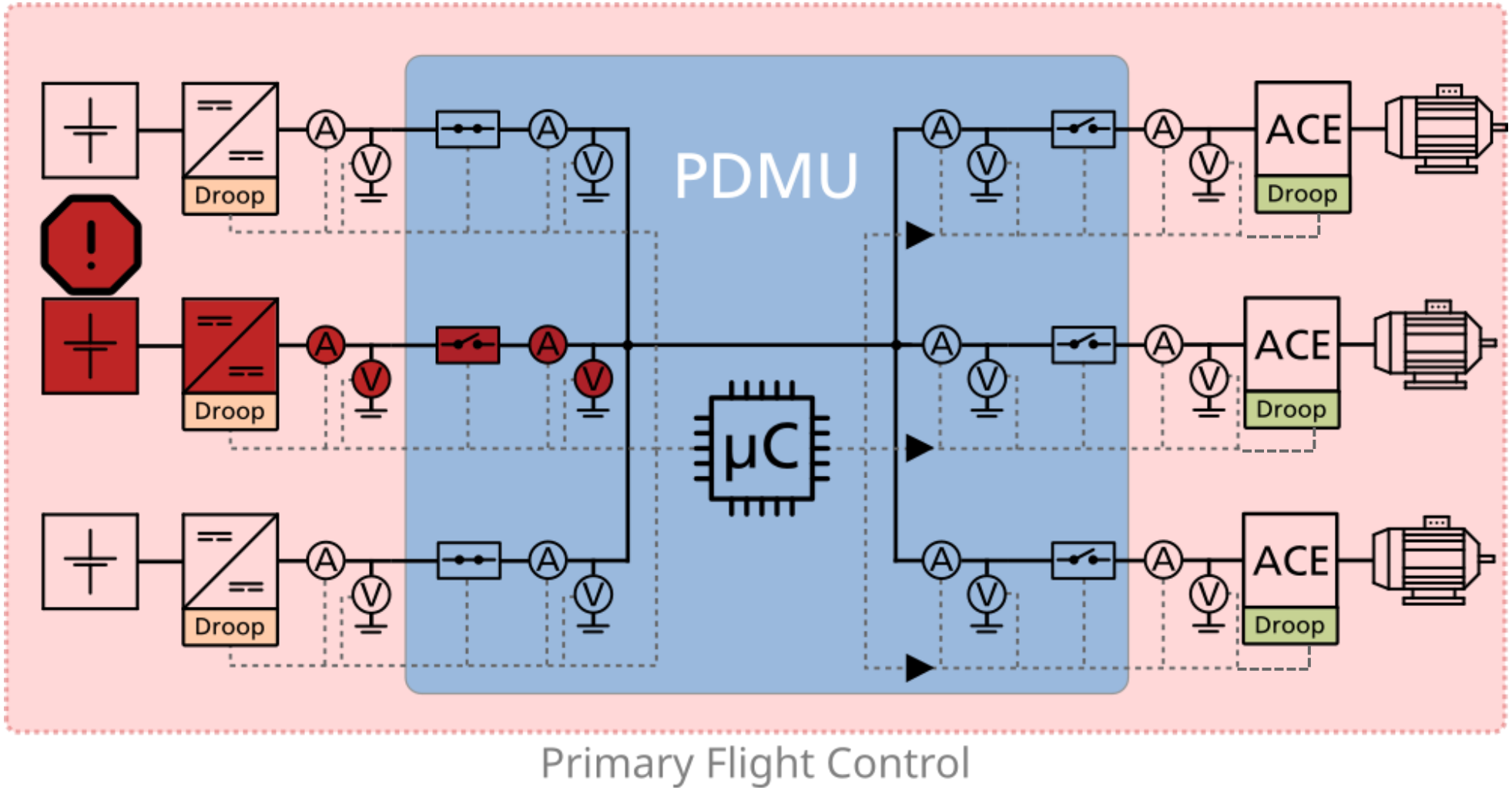
Use Case – Lokale Droop Regelung bei Spannungsabfall



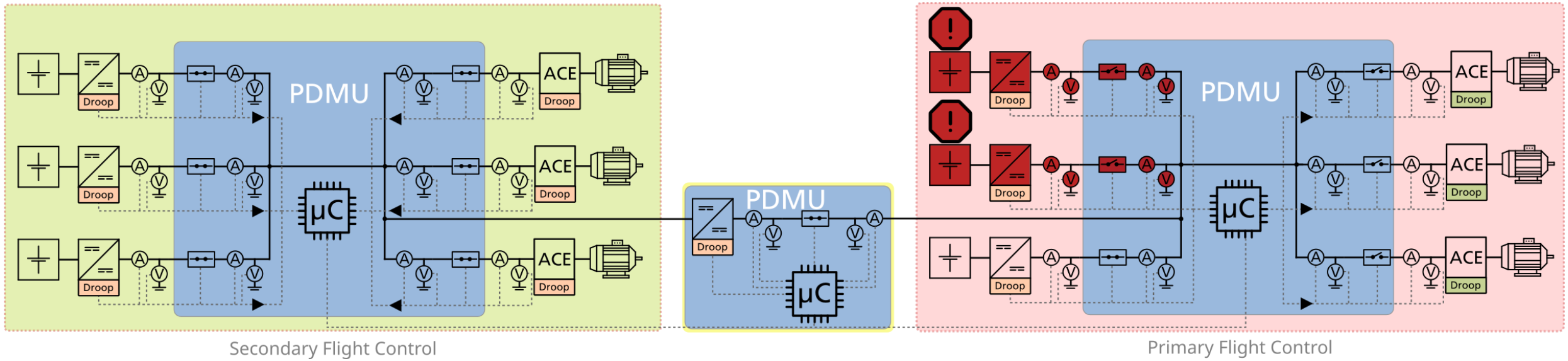
Use Case – Aktualisierung der Droop-Faktoren



Use Case – Identifikation fehlerhafter Quelle

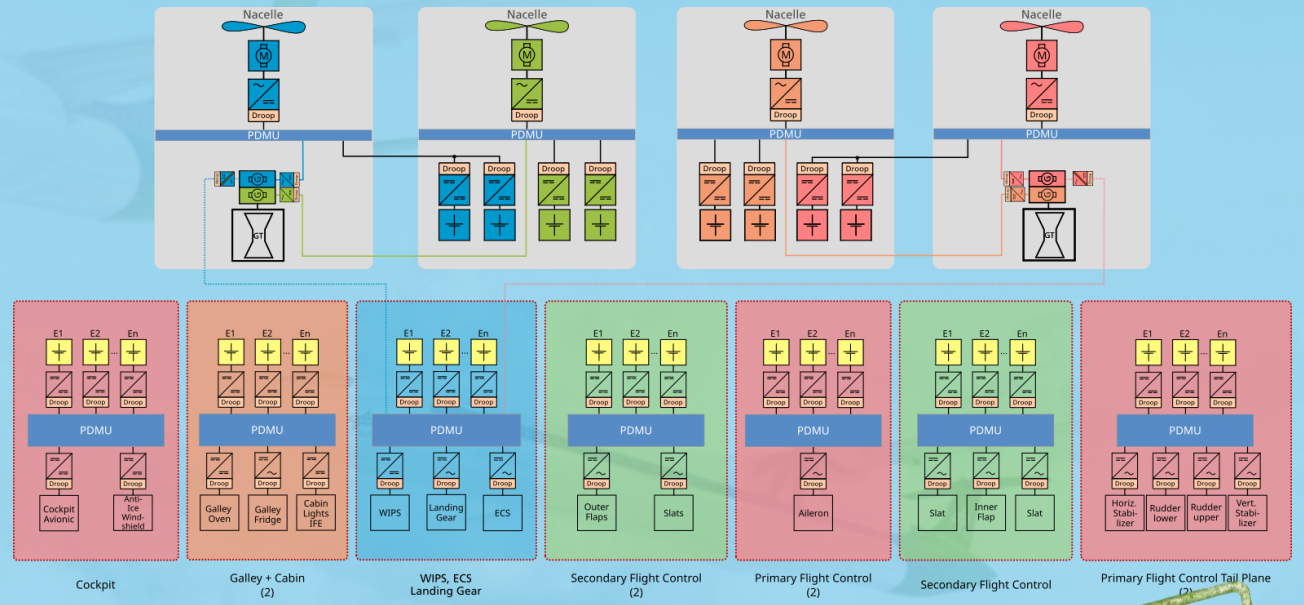


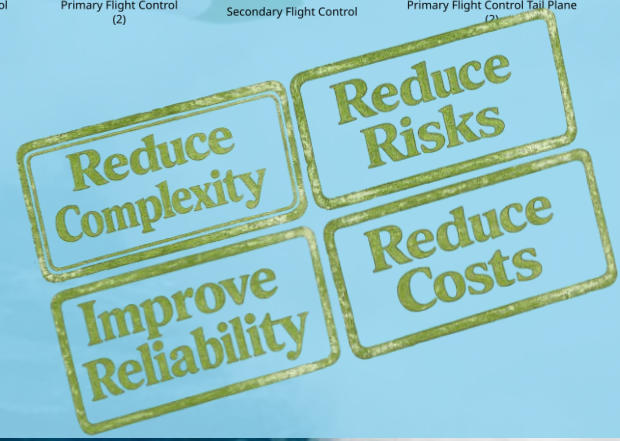
Use Case – Rekonfiguration



Key Take-Away-Messages

- Lastabwurf ist die letzte Eskalationsstufe. Kontrollierte Degradation stabilisiert das Netz und erhält möglichst viele Funktionen.
- Droop reagiert schnell, lokal und robust.
- Die PDMU koordiniert das Gesamtsystem. Sie wählt verfügbare Quellen und Pfade, vergibt Leistungsbudgets und passt Droop-Parameter an den Betriebszustand an.
- Das ermöglicht neue Bordnetzarchitekturen: weniger Komplexität und Installationsaufwand, bessere Nutzung vorhandener Ressourcen und höhere Verfügbarkeit.





BACK UP SLIDES

Lastseitiger P(U)-Droop: Leistungsreduktion bei sinkender Busspannung

$$P^*_{L,stat} = P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)$$

$P_{L,0} = 20\ kW$

$P_{min} = 5\ kW$

$V_0 = 540\ V$

$k_L = 0{,}5\ \frac{kW}{V}$

Beispiel 1: Busspannung nahe am Sollwert

$V_{Bus} = 535\ \mathrm{V}$

$\Delta V = V_{Bus} - V_0 = 535V - 540V = -5V$

$\Delta P_L = 0{,}5\ \frac{kW}{V} \cdot (-5V) = -2{,}5kW$

$P^*_{L,stat} = 20kW - 2{,}5kW = 17{,}5\ kW$

$$\boxed{I^*_L = \frac{P^*_{L,stat}}{V_{Bus}} = \frac{17{,}5kW}{535V} \approx 32{,}7\ A}$$

Ohne Last-Droop:

$$\boxed{I_{CPL} = \frac{P_{L,0}}{V_{Bus}} = \frac{20kW}{535V} \approx 37{,}4\ A}$$

Lastseitiger P(U)-Droop: Leistungsreduktion bei sinkender Busspannung

$$P^*_{L,stat} = P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)$$

$P_{L,0} = 20\ kW$

$P_{min} = 5\ kW$

$V_0 = 540\ V$

$k_L = 0{,}5\ \frac{kW}{V}$

Beispiel 2: Busspannung deutlich zu niedrig

$V_{Bus} = 480\ \mathrm{V}$

$\Delta V = V_{Bus} - V_0 = 480V - 540V = -60V$

$\Delta P_L = 0{,}5\ \frac{kW}{V} \cdot (-60V) = -30kW$

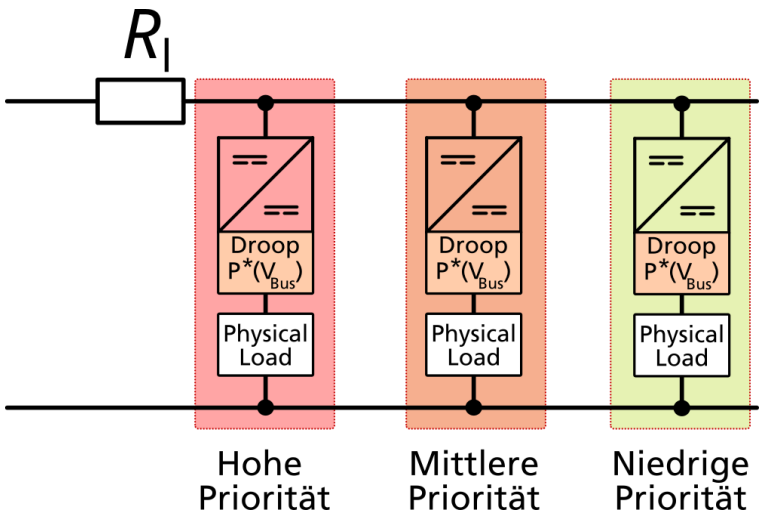
$P^*_{L,stat} = P_{min} = 5\ kW$

$$I^*_L = \frac{P^*_{L,stat}}{V_{Bus}} = \frac{5kW}{480V} \approx 10{,}4\ A$$

Ohne Last-Droop:

$$I_{CPL} = \frac{P_{L,0}}{V_{Bus}} = \frac{20kW}{480V} \approx 41{,}7\ A$$

Lastseitige Priorisierung durch unterschiedliche Droop-Faktoren



Alle Lasten messen die Busspannung:

$$V_{Bus,1} = V_{Bus,2} = V_{Bus,3}$$

Die Priorisierung entsteht durch die verschiedenen Droop-Kennlinienfaktoren $k_{L,i}$:

$$P^*_{L,stat,i} = sat_{[P_{min,i},P_{max,i}]}[P_{L,0,i} + k_{L,i}(V_{Bus,i} - V_0)]$$

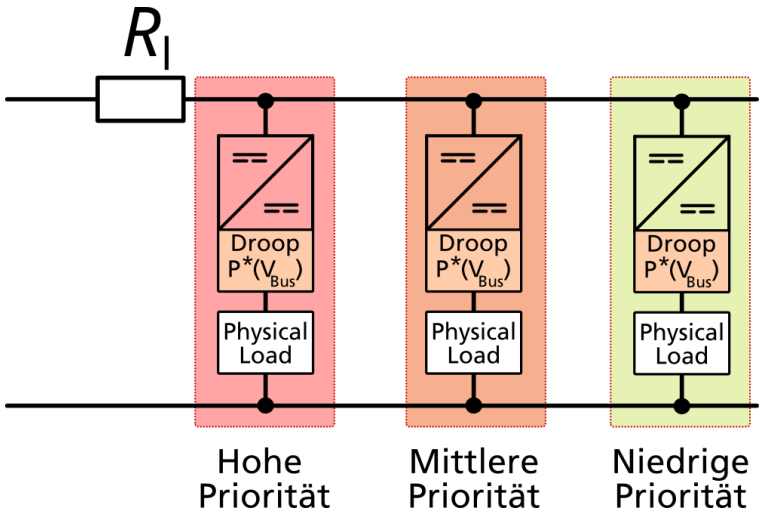
Bei Spannungsabfall gilt:

$$V_{Bus} - V_0 < 0$$

Ein größerer Droop-Kennlinienfaktoren $k_{L,i}$ zu einer stärkeren Leistungsreduktion

$$\boxed{k_{L,i} \uparrow \Rightarrow \; P^*_{L,i} \downarrow}$$

Beispiel:Lastseitige Priorisierung durch unterschiedliche Droop-Faktoren



$k_{L,i}$ klein ⇒ hohe Priorität

$k_{L,i}$ groß ⇒ starke Leistungsreduktion

Alle Lasten haben die gleiche Ausgangsleistung:

$$P_{L,1} = P_{L,2} = P_{L,3} = 20kW$$

Aktuell liegt Busspannung unter dem Sollwert:

$$V_{Bus} = 520V \quad V_0 = 540V$$

Hohe Priorität: $k_{L,1} = 0{,}05\,\frac{kW}{V}$

$$P^*_{L,stat,1} = 20kW + 0{,}05\,\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{19kW}$$

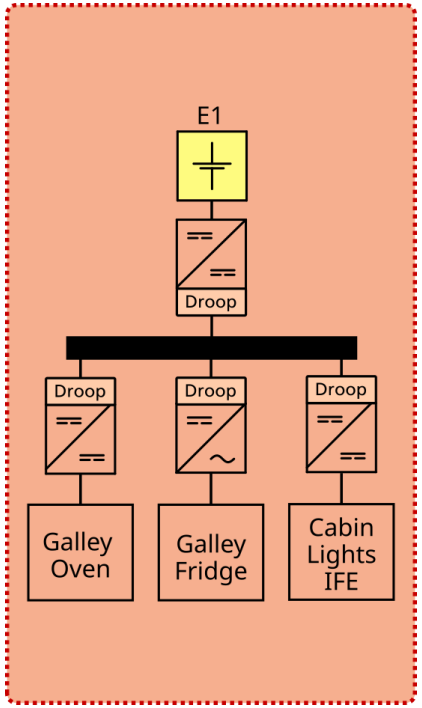
Mittlere Priorität: $k_{L,2} = 0{,}20\,\frac{kW}{V}$

$$P^*_{L,stat,2} = 20kW + 0{,}20\,\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{16kW}$$

Niedrige Priorität: $k_{L,3} = 0{,}50\,\frac{kW}{V}$

$$P^*_{L,stat,2} = 20kW + 0{,}50\,\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{10kW}$$

Konstante Droop Faktoren innerhalb eines Mikronetzes



Beispiel Cabin-Grid:

- Galley Oven: sehr flexibel → geringe Priorität
- Galley Fridge: moderat flexibel → mittlere Priorität
- Cabin Lights: geringe Reduktion → hohe Priorität

Last	$P_{L,0}$	k_L	P_{min}
Galley Oven	$20\ kW$	$0{,}5\ \frac{kW}{V}$	$0\ kW$
Galley Fridge	$3\ kW$	$0{,}0375\ \frac{kW}{V}$	$1{,}5\ kW$
Cabin Led Lights	$1{,}5\ kW$	$0{,}01875\ \frac{kW}{V}$	$0{,}75\ kW$

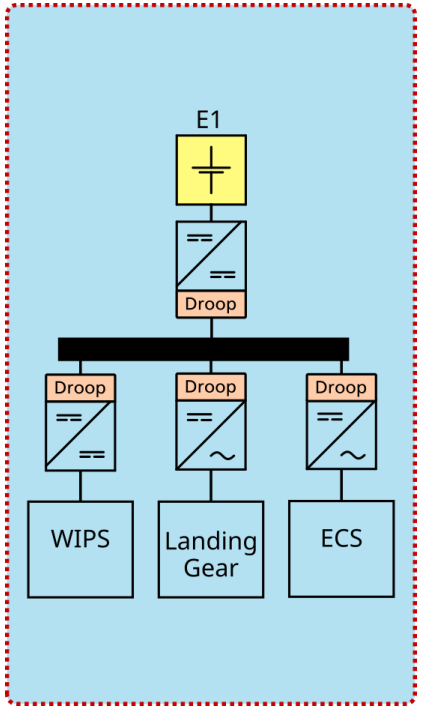
Ergebnis bei $V_{Bus} = 520V$

Galley Oven $P^*_{stat,Oven} = 20kW + 0{,}5\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{10kW}$

Galley Fridge $P^*_{stat,Fridge} = 3kW + 0{,}0375\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{2{,}25kW}$

Cabin Lights $P^*_{stat,Lights} = 1{,}5kW + 0{,}01875\frac{kW}{V} \cdot (-20V) = \boxed{1{,}125kW}$

Flugphasenabhängige Priorisierung durch adaptive Droop-Faktoren



Je nach Flugphase haben diese Lasten eine unterschiedliche Priorität

$$P^*_{L,stat,i} = sat_{[P_{min,i},P_{max,i}]}[P_{L,0,i}+k_{L,i}(z)\cdot(V_{Bus,i}-V_0)]$$

Mit dem Betriebszustand

$$z \in \{Cruise, Icing\ Conditions, Approach, Landing\ \ldots\}$$

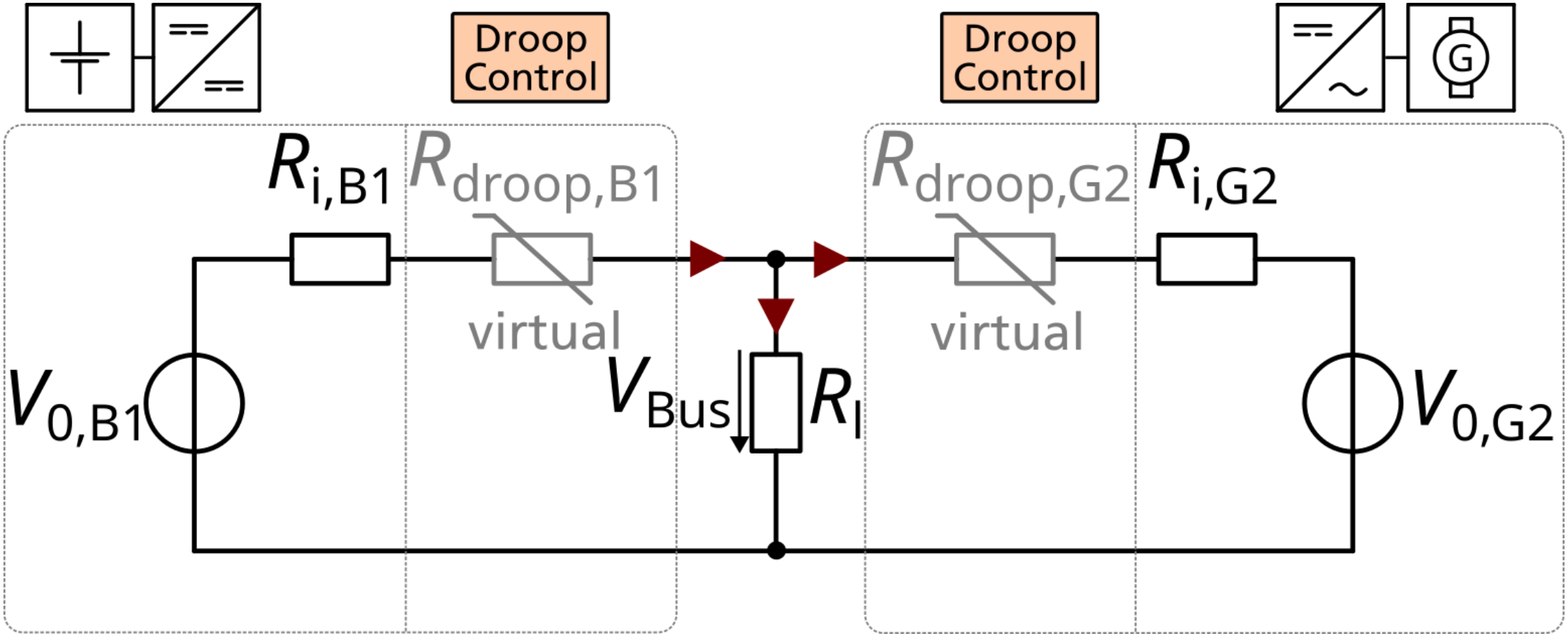
Beispielhafte Droop Faktoren

Last	$P_{L.0}$	Climb	Climb Icing	Cruise	Cruise Icing	Approach	Approach Icing
ECS	$190\ kW$	2,85	3,33	1,43	1,90	2,38	2,85
WIPS	$75\ kW$	Inaktiv	0,19	Inaktiv	0,19	Inaktiv	0,19
Landing Gear retract	$25\ kW$	0,05	0,05	Inaktiv	Inaktiv	Inaktiv	Inaktiv
Landing Gear extend	$15\ kW$	Inaktiv	Inaktiv	Inaktiv	Inaktiv	0,05	0,05

Droop-Regelung Erzeugungsseite: Batterie & Generator

$$V_B^* = V_{0,Bi} - R_{droop,Bi} \cdot I_{Bi}$$

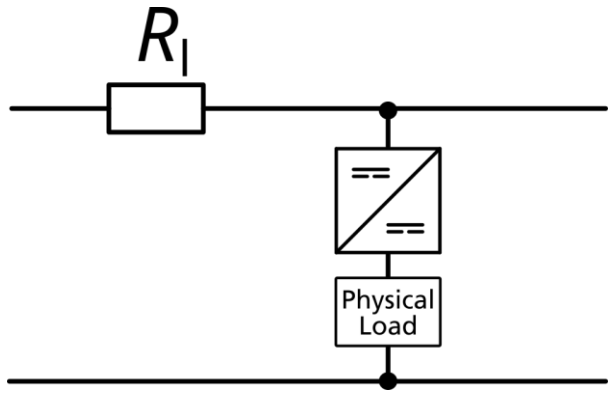
$$V_G^* = V_{0,Gi} - R_{droop,Gi} \cdot I_{Gi}$$



Berücksichtigung Dynamik: $\tau_i \frac{dI_i^*}{dt} + I_i^* = \frac{V_{0,i} - V_{Bus}}{R_{d,i}}$, $wobei\ \tau_B \ll \tau_G$

Constant Power Load Verhalten

Constant Power Load



Stromsollwert Constant Power Load ohne Droop:

$$I_L = \frac{P_L}{V_{Bus}}$$

$$V_{Bus} \downarrow \Rightarrow I_L \uparrow$$

Überblick On-Board Lasten mit Constant Power Load Verhalten (orange)

Last	Beschreibung	(Zeitweise) CPL
Primary Flight Controls - EHAs	dynamischer geregelter Motor-/Pumpenantrieb	Ja
Secondary Flight Controls - EMAs	dynamischer geregelter Motorantrieb	Ja
Main Landing Gear actuators - EHAs	dynamischer Hochleistungsantrieb	Ja
Nose Landing Gear actuators - EHAs	dynamischer Hochleistungsantrieb	Ja
Brakes - EHAs	dynamischer geregelter Aktuator	Ja
WIPS	resistive	Nein
ECS-base compressor	drehzahlgeregelter Motor	Ja
ECS-packs	gemischtes System aus Kompressoren, Ventilatoren..	Ja
ECS-Fans and other	drehzahlgeregelter Motor	Ja
ECS-VAC	geregelter Pumpen-/Motorantrieb	Ja
Anti-Ice - Sensors	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
Avionic Bay/Cockpit	DC/DC versorgte Geräte	Ja
Anti-Ice - Windshield	resistive	Nein
CIDS emergency	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
External Lights	LED-Treiber	Ja
IFE server	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
IFE devices	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
Cabin general illumination	LED-Treiber	Ja
Service supply	nur Bodenbetrieb	
Cabin reading lights	LED-Treiber	Ja
Water/Waste (auch in den Galleys!) + Water Heater in den Lavatory (200W)	Pumpen: CPL, Heating: Resistive	Ja
Galley ovens	resistive	Nein
Galley coffee machines/hot water	Pumpen: CPL, Heating: Resistive	Ja
CIDS	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
Seat Power (10 W per seat, grouped per line)	geregelte Elektroniklast mit Netzteil	Ja
Cargo doors	Motorantrieb	Ja
Cargo system	gemischte Aktuator-, Sensor- und Elektroniklast	Ja
Cargo Lights	LED-Treiber	Ja
Fuel System - Transfer pumps (10)	geregelte Motorantriebe	Ja
Fuel System - auxuillary pumps (8)	geregelte Motorantriebe	Ja
Fuel System Valves	elektromagnetische oder motorische Ventile	Nein

Übersicht Droop Regelung

Erzeugerseite	Lastseite
V(I) Droop	P(V) Droop
$V_i^* = V_{0,i} - R_{droop,i} \cdot I_i$	$P_{L,stat}^* = P_{L,0} + k_L(V_{Bus} - V_0)$
virtueller Innenwiderstand	spannungsabhängige Leistungskennlinie
Strom seigt → Spannungssollwert sinkt	Spannung sinkt → Lastleistung sinkt
Aufteilung zwischen Quellen	Leistungsbegrenzung und Lastdegradation