

3 Bordstromversorgung

Electrical Power, ATA 24

3.1 Definition

Die elektrischen Einheiten und Komponenten, die Wechselstrom und/oder Gleichstrom erzeugen, regeln und damit andere Systeme über Sammelschienen versorgen. Beinhaltet Generatoren, Relais, Gleichrichter, Batterien. Beinhaltet weiterhin allgemeine elektrische Teile wie Leitungen, Schalter und Stecker etc. (ATA 100)

3.2 Gliederung

Die Bordstromversorgung beinhaltet:

- Leistungserzeugung:
 - Generatorantriebssystem: Gleichdrehzahlgetriebe (constant speed drive, CSD)
 - Wechselstromerzeugung
 - Gleichstromerzeugung
 - Außenbordanschluss
- Leistungsverteilung:
 - Wechselstromlastverteilung
 - Gleichstromlastverteilung.

3.3 Leistungserzeugung

Die Leistung wird mittels verschiedener elektrischer Komponenten erzeugt. Kleinflugzeuge nutzen 14 V oder 28 V *Gleichstrom* (direct current, DC), der durch Generatoren (generator) oder Wechselstromgeneratoren (alternator) erzeugt werden kann. Großraumflugzeuge (large aircraft) verwenden Generatoren, die einen *Wechselstrom* (alternating current, AC) von 115 V mit 400 Hz erzeugen. Verglichen mit einem 28 V DC System, erzeugt ein 115 V AC System, bei gleichem Systemgewicht, ein Vielfaches an Leistung. Daher besitzt das Wechselstromsystem, insbesondere bei großen elektrischen Lasten, einen Vorteil gegenüber dem Gleichstromsystem.

Früher wurden in kleinen Flugzeugen häufig *Gleichstromgeneratoren* eingesetzt. Bei modernen Luftfahrzeugen sind diese jedoch durch Wechselstromgeneratoren mit Gleichrichtern ersetzt worden. Es handelt sich um einen Drei-Phasen Zweiwegegleichrichter (three-phase full-

wave rectifier) um Gleichstrom zu erzeugen. Dabei ist der Gleichrichter im Wechselstromgenerator integriert, so dass der Generator Gleichstrom mit einer Nennspannung von, entweder 14 V für ein 12 V Batteriesystem oder mit 28 V für ein 24 V Batteriesystem, erzeugt.

Ein *Startgenerator* (starter-generator) ist eine Kombination aus einem Gleichstromgenerator und einem Gleichstrommotor. Beide Einheiten sind in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Startgeneratoren werden üblicherweise an kleinen Turbopropflugzeugen oder kleinen turbinengetriebenen Flugzeugen verwendet.

Wechselstromgeneratoren sind in Großraumflugzeugen und in vielen Militärmaschinen anzutreffen. Sie bestehen aus einem Drehfeld (das über äußere Schleifringe (slip rings) mit Strom versorgt wird) und einem feststehendem Anker (stationary armature). Der Flugzeugwechselstromgenerator ist eine Drei-Phasen Einheit und hat drei verschiedene Windungen, die jeweils um 120° gegeneinander verdreht angeordnet sind.

Verkehrsflugzeuge (large commercial airliner) verwenden Drei-Phasen Wechselstromgeneratoren mit einer sterngeschalteten Statorwicklung (Y-connected stator winding). Besitzen die Generatoren keine Schleifringe, so nennt man sie *bürstenlose Generatoren* (brushless generator.) Die Ausgangsfrequenz ist von der Drehzahl (drive speed) des Generators abhängig. Um die geforderte Frequenz von 400 Hz zu erzeugen, benötigt man ein Gleichdrehzahlgetriebe. Der in das Gleichdrehzahlgetriebe integrierte Generator (Integrated Drive Generator, IDG) beinhaltet sowohl das Gleichdrehzahlgetriebe (Constant Speed Drive, CSD) als auch den Generator. Details dieses modernen Systems werden später am Beispiel des Airbus A321 erklärt.

Vorteile von Wechselstrom-Hochspannungssystemen sind:

- Gewichtseinsparung
- Möglichkeit zur Spannungstransformation
- Geringe Stromstärke, geringer Leistungsverlust in der Verkabelung

Elektrische Leistungserzeugungssysteme in Großraumflugzeugen weisen eine Reihe von typischen *Komponenten* auf:

- Eine *Generatorregelunit* (generator control unit, GCU) ist ein Festkörperbauteil. Es reguliert die Spannung, limitiert den Strom und regelt die Frequenz.
- Ein *Wechselrichter* (inverter) konvertiert Gleichstrom in Wechselstrom einer geforderten Frequenz (400 Hz). Heute werden *elektronische Wechselrichter* (static inverter) eingesetzt, die aus Komponenten der Leistungselektronik aufgebaut sind.
- Ein *Transformator-Gleichrichter* (transformer rectifier, TR) wandelt Wechselstrom in Gleichstrom um bei gleichzeitig veränderter Spannung.
- Ein *drehzahlvariables Konstantfrequenzsystem* (variable-speed constant-frequency, VSCF) besteht aus einem Generator, der direkt vom Triebwerk angetrieben wird. Dieses System besitzt kein Gleichdrehzahlgetriebe. Der Generator wird somit bei verschiedenen

Drehzahlen angetrieben und produziert unterschiedlichste Ausgangsfrequenzen. Eine Regeleinheit (generator converter control unit) wandelt die verschiedenen Frequenzen in eine konstante Frequenz von 400 Hz um. Ein VSCF System findet man z. B. an einer Boeing 737.

3.4 Leistungsverteilung

Der Aufbau des Leistungsverteilungssystems ist abhängig von

1. der Größe des Flugzeugs und demzufolge von der Komplexität des Systems.
2. der Art des primären Leistungserzeugungssystems (Wechselstrom oder Gleichstrom)

Ein **einfaches Leistungsverteilungssystem** besteht aus einer Verteilerschiene (bus bar) oder einer Sammelschiene (bus). Die Sammelschiene ist eine Leitung, die die gesamte elektrische Last aufnimmt. Ferner verteilt sie die Last zu den individuellen Leistungsverbrauchern. Jeder einzelne Leistungsverbraucher ist über einen Schutzschalter (circuit breaker) an der Sammelschiene angeschlossen. Das beschriebene Verteilungssystem findet man an kleinen, einmotorigen Flugzeugen (single-engine aircraft).

Komplexere Leistungsverteilungssysteme bestehen aus *Verteilerschienen*, *Verteilerschienenschutzschaltern* (bus tie breaker, BTB) und kontaktlosen Steuerungen, wie zum Beispiel die *Generatorregeleinheiten*.

Die in Großraumflugzeugen verwendeten **elektrischen Leistungsverteilersysteme** weisen eine Reihe von typischen **Komponenten** auf:

- Ein *Verteilerschienenschütz* (bus tie contactor, BTC) (auch bekannt als Verteilerschienenschutzschalter) ist ein Magnetschalter, der zwei Verteilerschienen verbindet.
- Ein *Generatorschütz* (generator line contactor, GLC) (auch bekannt als Generatorschutzschalter) ist vergleichbar mit einem BTC. Ein GLC hingegen verbindet Generatoren mit Verteilerschienen.
- *Verteilerschienen-Leistungsregeleinheiten* (bus power control unit, BPCU) werden mit Informationen von allen Bauteilen des Verteilungssystems versorgt. Mit Hilfe dieser Informationen, stellen die BPCUs sicher, dass das Verteilungssystem angemessen konfiguriert ist. Bei manchen Bauweisen beinhalten die GCUs die BPCU-Funktionen. Die BPCUs ermöglichen eine Rekonfiguration des Leistungssystems zwischen den einzelnen Sammelschienen. Fällt zum Beispiel ein Generator aus oder weist eine Sammelschiene einen Kurzschluss auf, so müssen die entsprechenden BTCs und GLCs ordnungsgemäß geschaltet sein. Im Falle einer Systemüberlastung muss die Regeleinheit die elektrische Last auf ein akzeptables Niveau reduzieren. Diesen Vorgang nennt man *Lastabwurf* (load shed-

ding). Üblicherweise wird als erstes die Flugzeugküche (galley) vom Leistungssystem getrennt, da sie keine lebenswichtige Funktion erfüllt.

Bild 3.1 zeigt **zwei prinzipielle Arten der Verteilungssysteme** mit

1. *primärer Wechselstromerzeugung (AC)* und einer Gleichstrom (DC) Generierung mithilfe eines Transformator-Gleichrichters,
2. *primärer Gleichstromerzeugung (DC)* und einer Wechselstrom (AC) Generierung mithilfe eines Wechselrichters (static inverter).

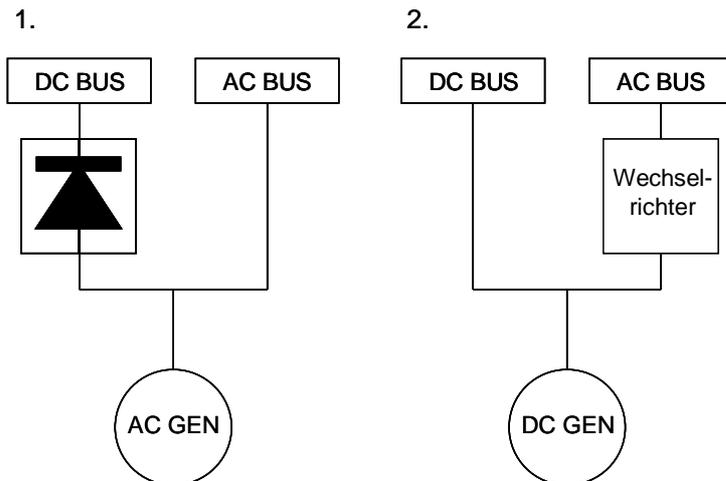


Bild 3.1 Verteilungssystem mit primärer Wechselstrom-Leistungserzeugung (AC) primärer Gleichstrom-Leistungserzeugung (DC)

Bei Großraumflugzeugen wird primär Wechselstrom (AC) erzeugt. Für Großraumflugzeuge existieren zu dieser grundsätzlichen Lösung **drei unterschiedliche Leistungsverteilungssysteme hinsichtlich der Anordnung der Sammelschienen**. Es wird unterschieden:

1. das getrennte System (split-bus system)
2. das parallele System (parallel system)
3. das getrennt-parallele System (split parallel system)

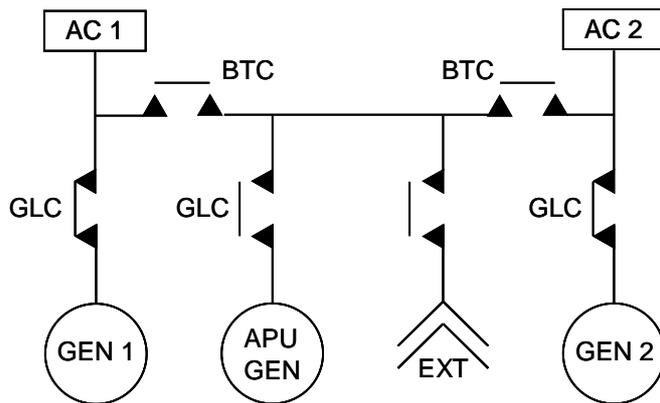


Bild 3.2 Gewöhnliches Layout eines getrennten Sammelschienensystems

Das **getrennte System** (Bild 3.2) beinhaltet zwei von einander getrennte Leistungserzeugungssysteme. Jedes System besitzt einen eigenen Wechselstromgenerator. Generator 1 (GEN 1) und Generator 2 (GEN 2) erzeugen die geforderten Leistungen unabhängig vom anderen System. Im Falle eines Generatorfehlers wird der verbliebene Generator mit beiden Sammelschienen (AC 1 und AC 2) verbunden. Zusätzlich kann der APU Generator (auxiliary power unit generator, APU) verwendet werden, um die elektrische Last des ausgefallenen Generators zu übernehmen. Der Hauptvorteil des getrennten Sammelschienensystems ist, dass beide Generatoren unabhängig voneinander operieren. Daher müssen die Ausgangsfrequenzen und die Phasenverhältnisse nicht exakt übereinstimmen. Ein getrenntes Sammelschienensystem wird im A321 und in den moderneren zweistrahligen Verkehrsflugzeugen (twin engine transport category aircraft) verwendet. Ein Bild des elektrischen Systems eines A321 wird im Abschnitt 3.5 gezeigt.

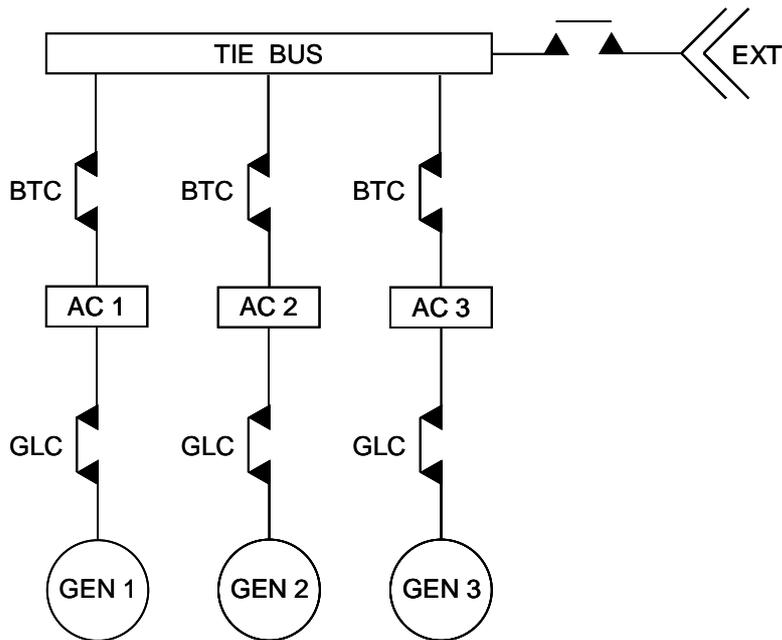


Bild 3.3 Gewöhnliches Layout eines parallelen Systems

In einem **parallelen System** (Bild 3.3) sind alle Wechselstromgeneratoren mit einer Verbindungssammelschiene (tie bus) verbunden. Bei dieser Systemkonfiguration wird die Last auf sämtliche Generatoren gleichmäßig verteilt. Da alle Generatoren mit einer Sammelschiene parallel verschaltet sind, müssen die Generatorspannungen, die Generatorfrequenzen und die Phasenlage (phase sequence) innerhalb strikter Grenzen liegen, um einen einwandfreien Systembetrieb zu garantieren. Fällt ein Generator aus, so wird er von der Lastsammelschiene (load bus) isoliert. Trotz des Ausfalls wird die Lastsammelschiene weiterhin mit Leistung versorgt, solange sie mit der Verbindungssammelschiene verbunden ist. Ein paralleles System wird zum Beispiel bei der Boeing 727 verwendet.

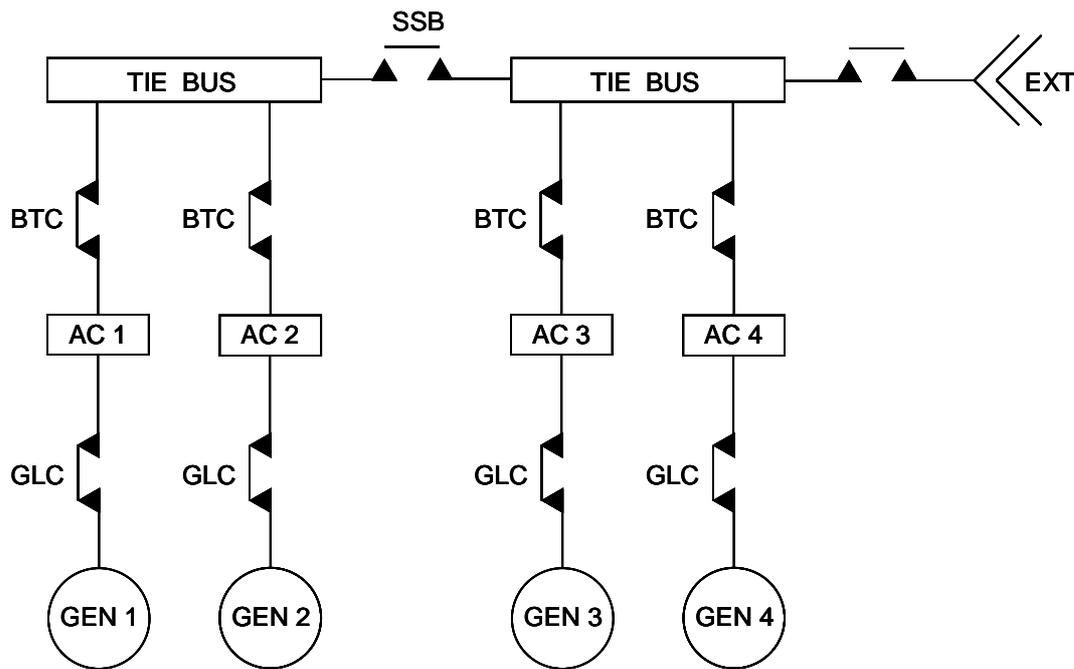


Bild 3.4 Gewöhnliches Layout eines getrennt-parallelen Systems

Ein **getrennt-paralleles System** (Bild 3.4) bietet eine höhere Flexibilität bei der Lastverteilung und ermöglicht die Isolation von Systemen. Die Wechselstromsammelschienen werden mittels des Verteilerschienen-Schutzschalters (BTC) und eines Schalters zwischen den Verbindungssammelschienen (split system breaker, SSB) parallel verschaltet. Ist der SSB geöffnet können das rechte und das linke System unabhängig voneinander arbeiten. Im Fehlerfall wird der SSB geschlossen. Dann kann jeder Generator jede Lastsammelschiene (AC 1, AC 2...) mit Leistung versorgen. Dabei können die Generatoren (GEN 1, GEN 2...) beliebig parallel zusammen geschaltet werden. Ein getrennt-paralleles System wird bei der Boeing 747-400 verwendet.

Betrachten wir nun die **Gleichstromverteilungssysteme** an Flugzeugen, mit primärer Wechselstromleistungserzeugung. Über eine Wechselstromsammelschiene (AC) werden Transformator-Gleichrichter gespeist, die die Hauptgleichstromverteilerschienen (main dc bus bar) versorgen. Im Falle eines kompletten Generatorsausfalls, erzeugen die Flugzeugbatterien die notwendige DC-Leistung. Ein Wechselrichter würde in einem solchen Fall ebenfalls von den Batterien versorgt und die Wechselstromlasten abdecken.

Das elektrische Bordnetz eines Flugzeugs ist nach einer **Leistungsverteilungshierarchie** ausgelegt. Das System ist so dimensioniert, dass die kritischsten Komponenten die geringste Ausfallwahrscheinlichkeit besitzen. Die Generatoren versorgen ihre entsprechende Sammelschiene AC 1 und AC 2. Diese Sammelschienen versorgen die unwichtigeren Wechselstromverbraucher. Die wichtigen Wechselstromverbraucher, werden über die essentielle AC Sammelschiene (essential ac bus, AC ESS) betrieben. Das Gleiche gilt für die Gleichstromsammelschienen: Die unwichtigeren DC Abnehmer werden über die DC 1 und DC 2 Sammel-

schienen, ausgehend von den Transformator-Gleichrichtern (TR 1, TR 2), versorgt. Die wichtigeren Systeme beziehen ihre Leistung von der essentiellen DC Sammelschiene (essential dc bus, DC ESS), die von jedem Transformator-Gleichrichter versorgt werden kann. Die kritischsten Lasten werden von der Batterie-Sammelschiene bedient (bat bus).

3.5 Beispiel: Airbus A321

Im A321 wird *primär AC Leistung* erzeugt. Über Transformator-Gleichrichter erfolgt eine Umwandlung des Wechselstroms in Gleichstrom. Beim Verteilungssystem handelt es sich um ein getrenntes System (split-bus system) dieses besteht aus zwei separaten Verteilungsnetzwerken. Normalerweise versorgt ein Hauptgenerator jeweils ein Netzwerk. Die zwei Verteilungsnetzwerke können verbunden werden, wenn das Flugzeug über eine externe Leistungsquelle (external power) versorgt wird, Leistung von der APU bezieht, oder wenn ein Hauptgenerator ausgefallen ist. Unter keinen Umständen, dürfen zwei Generatoren miteinander verbunden werden.

Die **Leistungserzeugung im A321** umfasst, primäre AC-Leistungserzeugung im Flug und am Boden, sowie DC-Leistungserzeugung und eine Leistungsumwandlung von DC in AC. Die Lage der einzelnen Komponenten im Flugzeug, zeigt Bild 3.5.

Im Flug versorgen zwei triebwerksgetriebene Generatoren (engine-driven generator, GEN 1 und GEN 2) das elektrische Bordnetz des Flugzeugs. Die Generatoren werden auch als „*Integrated Drive Generator*“ bezeichnet. Ein dritter, von der APU angetriebener Generator, kann einen triebwerksgetriebenen Generator ersetzen. Im Falle eines größeren Fehlers, versorgt ein Generator gekoppelt mit einem „*Constant-Speed Motor/Generator*“ (CSM/G) die notwendigsten Bauteile des elektrischen Bordnetzes. Der CSM/G wird über die Stauluftturbine (ram air turbine, RAT) mittels des blauen Hydrauliksystems angetrieben.

Am Boden kann das Flugzeug von einem externen Bodenaggregat (ground power unit, GPU) versorgt werden. Als Alternative kann der APU Generator als unabhängige Quelle für die Versorgung des elektrischen Bordnetzes benutzt werden.

Die genannten Leistungsquellen versorgen das Verteilungsnetzwerk mit AC-Leistung. **DC-Leistung** wird über die *Transformator-Gleichrichter* bereitgestellt. Zwei *Batterien* fungieren im Notfall als DC Leistungsquelle und ermöglichen ein Starten der APU im Flug oder am Boden.

Durch die Verwendung eines elektronischen Wechselrichters, kann im **Notfall AC-Leistung** aus dem Strom von den Batterien erzeugt werden.

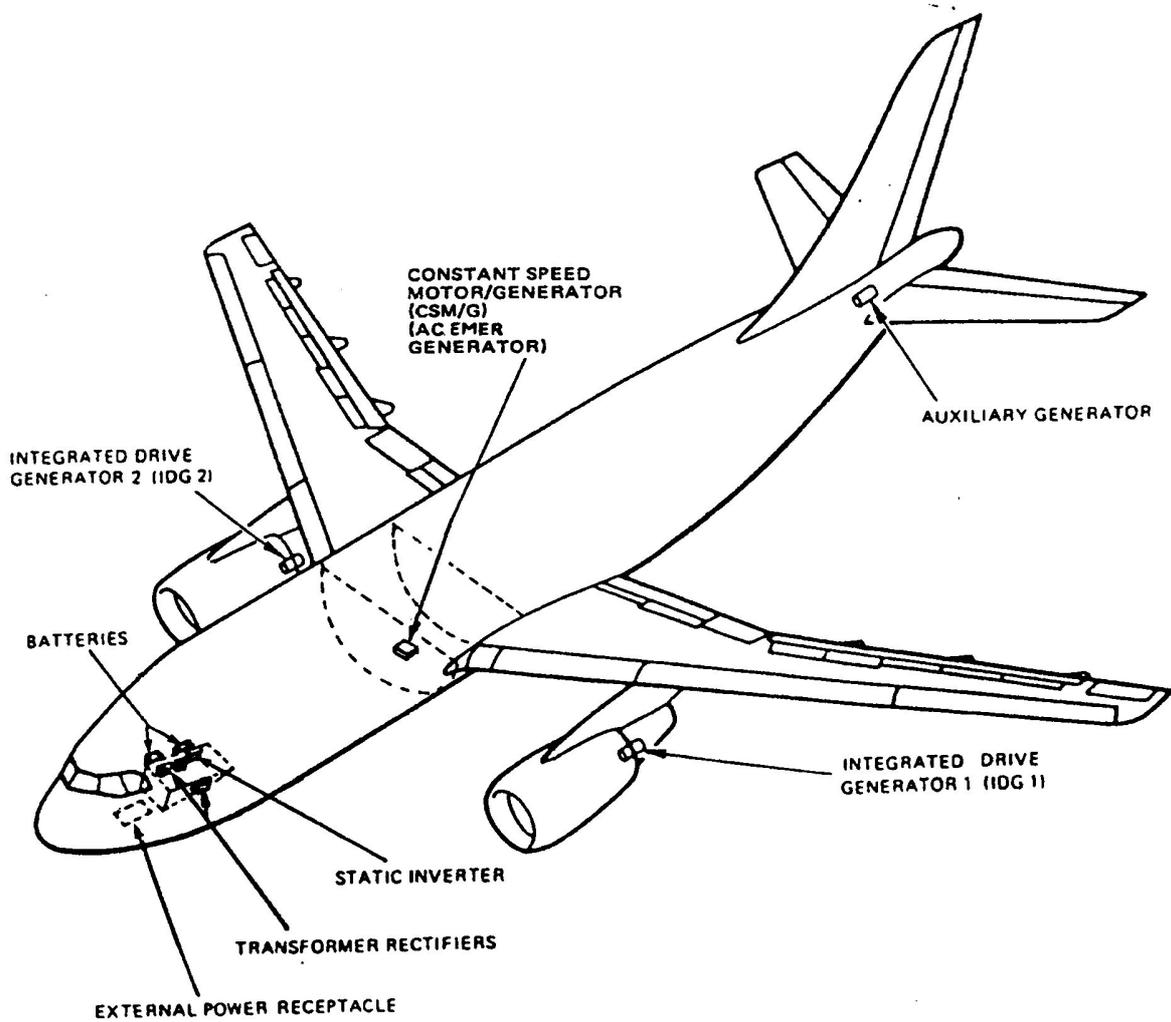


Bild 3.5 Elektrische Leistungsquellen und ihre Lage im A321

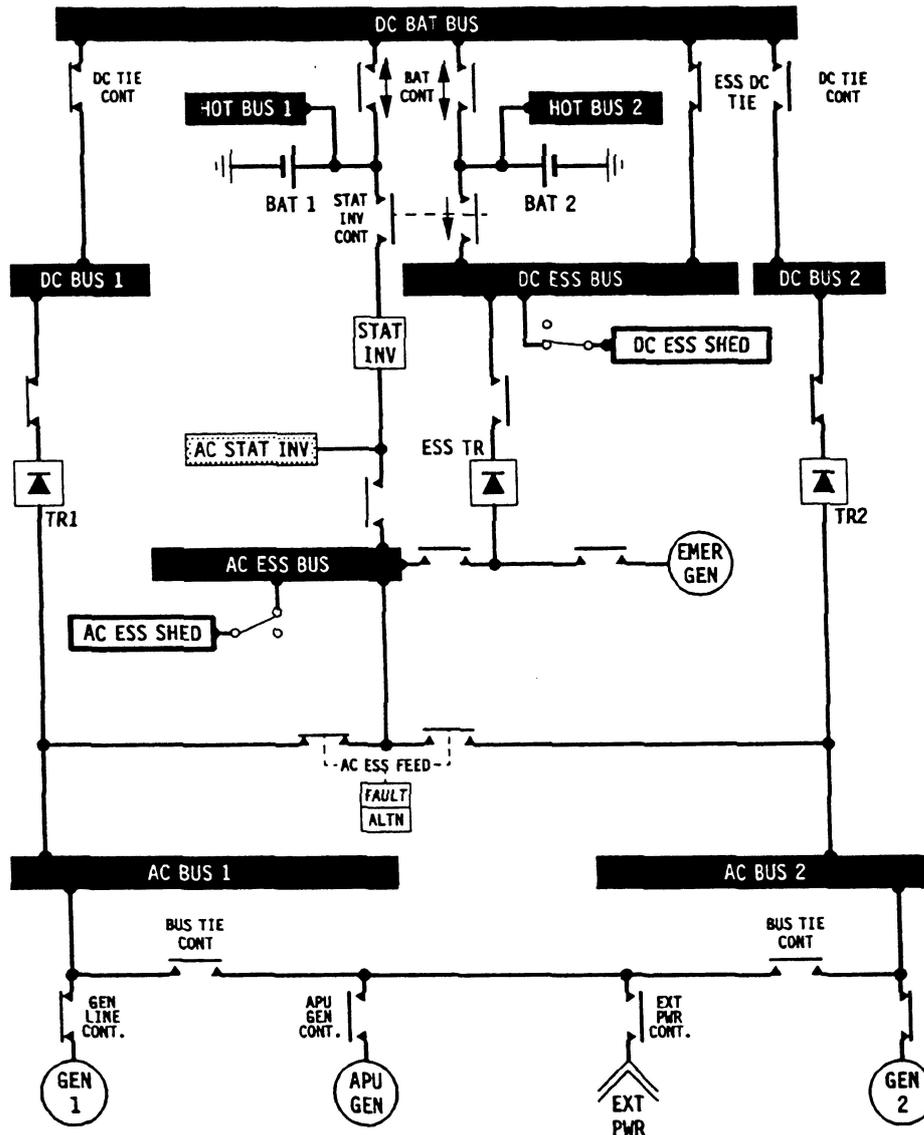


Bild 3.6 Elektrisches Systemdiagramm des A321

Die **Leistungsverteilung im A321** umfasst (Bild 3.6):

- Das *Verteilungsnetzwerk 1*, bestehend aus: AC BUS 1, AC ESS BUS, AC ESS SHED. Die AC ESS SHED darf vom Netz genommen werden, wenn ein Mangel an Leistung vorherrscht.
- Das *Verteilungsnetzwerk 2*, bestehend aus dem AC BUS 2.
- Der *Transformator-Gleichrichter 1* (TR 1), wird über den AC BUS 1 betrieben und versorgt über einen Schaltschütz: DC BUS 1, DC BAT BUS, DC ESS BUS, DC ESS SHED. Die DC ESS SHED darf vom Netz genommen werden, wenn ein Mangel an Leistung vorherrscht.
- *Zwei Batterien*, die mit dem DC BAT BUS verbunden sind.
- Der *Transformator-Gleichrichter 2* (TR 2), wird über den AC BUS 2 betrieben und versorgt über einen Schaltschütz den DC BUS 2.

- Ein dritter, *essentieller Transformator-Gleichrichter* (ESS TR), kann vom AC BUS 1 oder vom Notfallgenerator (emergency generator, EMER GEN) versorgt werden. Der ESS TR kann in bestimmten Situationen den DC ESS BUS und den DC ESS SHED über einen Schaltschütz versorgen.

Im Falle eines Fehlers existieren verschiedenste Möglichkeiten einer Rekonfiguration.

Jede Triebwerkshochdruckstufe treibt den zugehörigen **Integrated Drive Generator** über ein Hilfsgerätegetriebe (accessory gearbox) an (Bild 3.7). Die Drehzahl variiert und ist abhängig von der Triebwerksleistung (engine rating). Der IDG erzeugt eine dreiphasige Wechselspannung von 115/200V und 400 Hz. Er besteht aus zwei Teilen: dem *Gleichdrehzahlgetriebe* (CSD) und dem *Generator*. Der hydromechanische CSD treibt den vierpoligen Wechselstromgenerator bei einer konstanten Nenndrehzahl von 12000 1/min an.

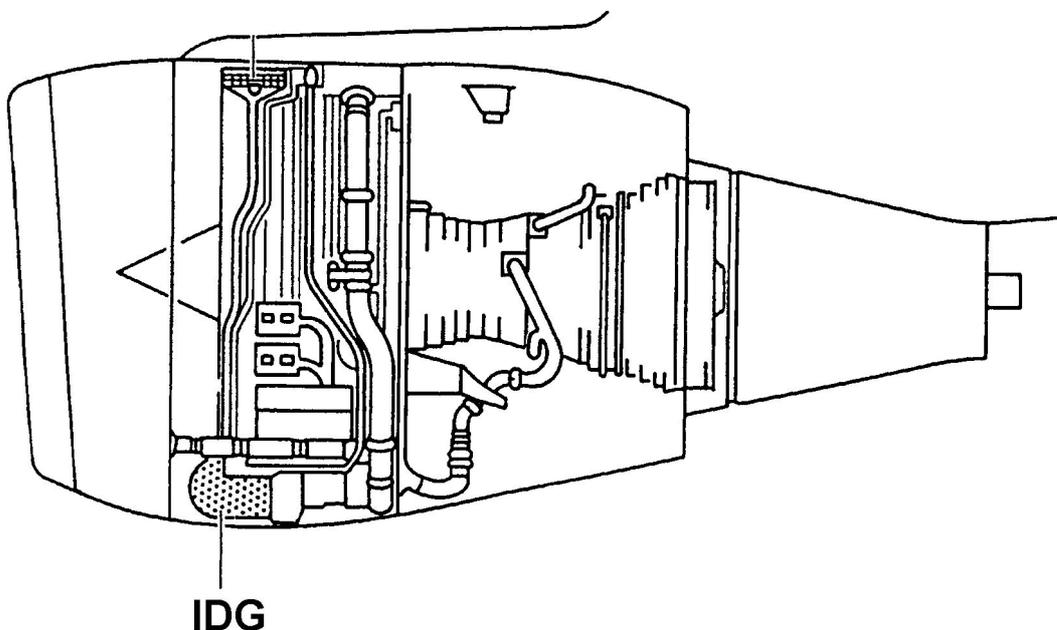


Bild 3.7 Lage des Integrated Drive Generator im A321

Das **Gleichdrehzahlgetriebe** besteht aus einem mechanischen Differentialgetriebe und überträgt die Leistung zum Generator des IDG. Die Ausgabedrehzahl des Differentialgetriebes, wird durch zwei mechanisch gekoppelte Hydraulikeinheiten verändert. Es handelt sich dabei um eine Pumpe und einen Motor. Jedes Teil beinhaltet eine hydraulische Schrägscheibe (swash plate): die Pumpe besitzt eine im Winkel verstellbare Schrägscheibe, der Motor hingegen ist mit einer festen Schrägscheibe ausgestattet. Ein Regler (governor) steuert die Ausgangsdrehzahl des CSD, über die verstellbare Schrägscheibe (Bild 3.8).

Beim **Generator** handelt es sich um ein dreistufiges Aggregat. Er beinhaltet drei miteinander verbundene Maschinen in einer Kaskade. Die *erste Maschine* ist ein 12-poliger Permanent-

magnetgenerator (PMG). Die *zweite Maschine* ist ein 10-poliger Stator und empfängt Felderregung (field excitation) von der ersten Maschine über einen Spannungsregler in der Generatorregleinheit. Der Gleichstrom der zweiten Maschine, versorgt das rotierende Feld (rotating field) von der *dritten Maschine* (dem Hauptwechselstromgenerator). Der Hauptwechselstromgenerator besitzt eine dreiphasige, sternverschaltete Statorwicklung (star-connected stator winding). Die drei Phasen und der Sternpunkt sind mit der Generatorausgangsklemme (generator output terminal block) verbunden.

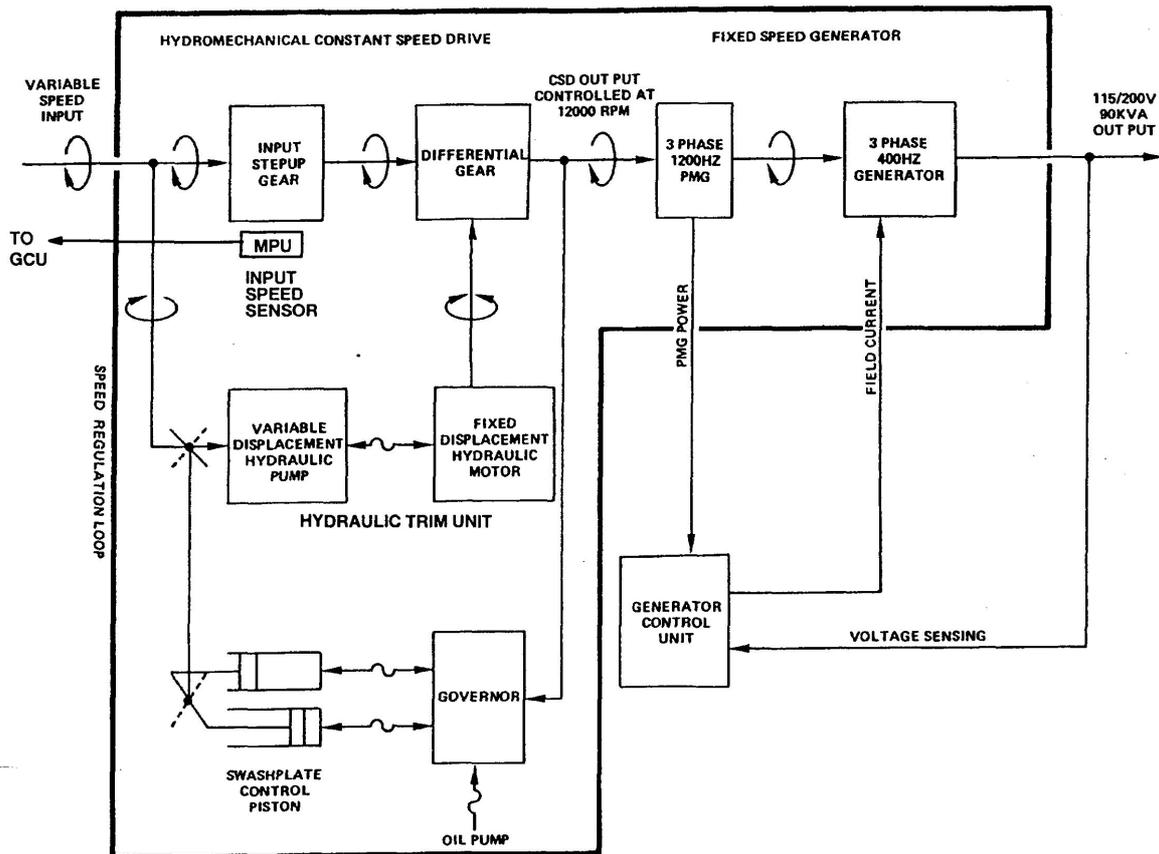


Bild 3.8 A321 Integrated Drive Generator (IDG): Drehzahlumwandlung und Leistungserzeugung