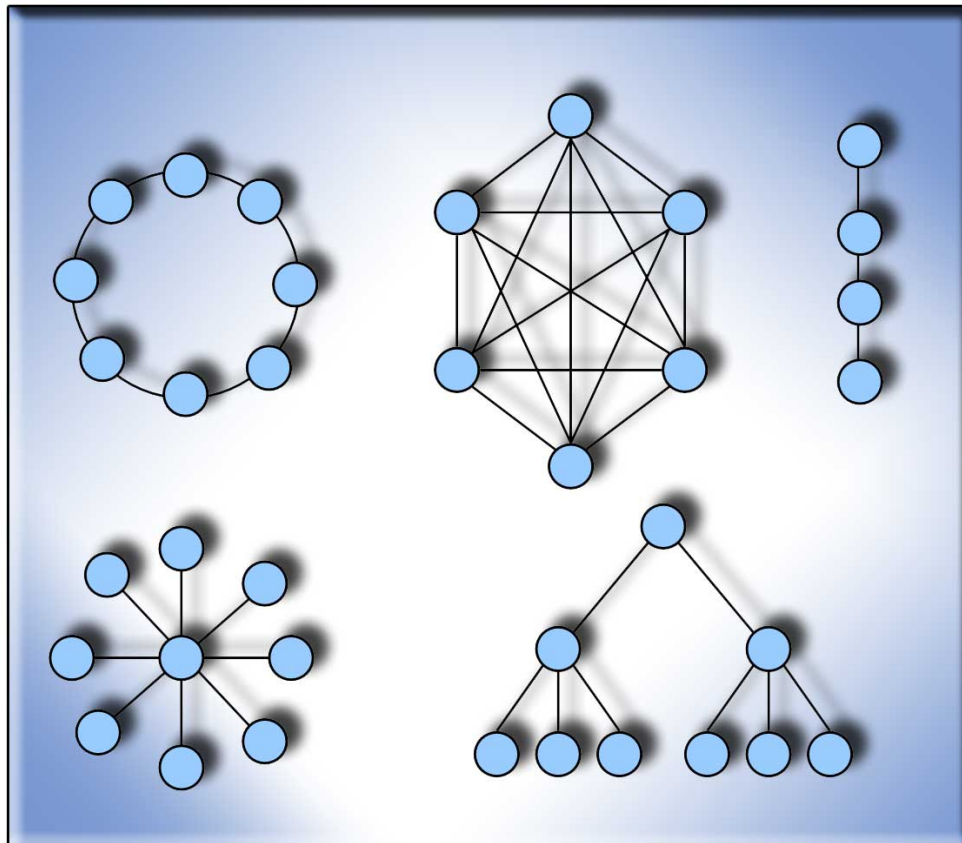


# Topologiebetrachtungen von Automatisierungnetzwerken



Fachhochschule  
Hannover

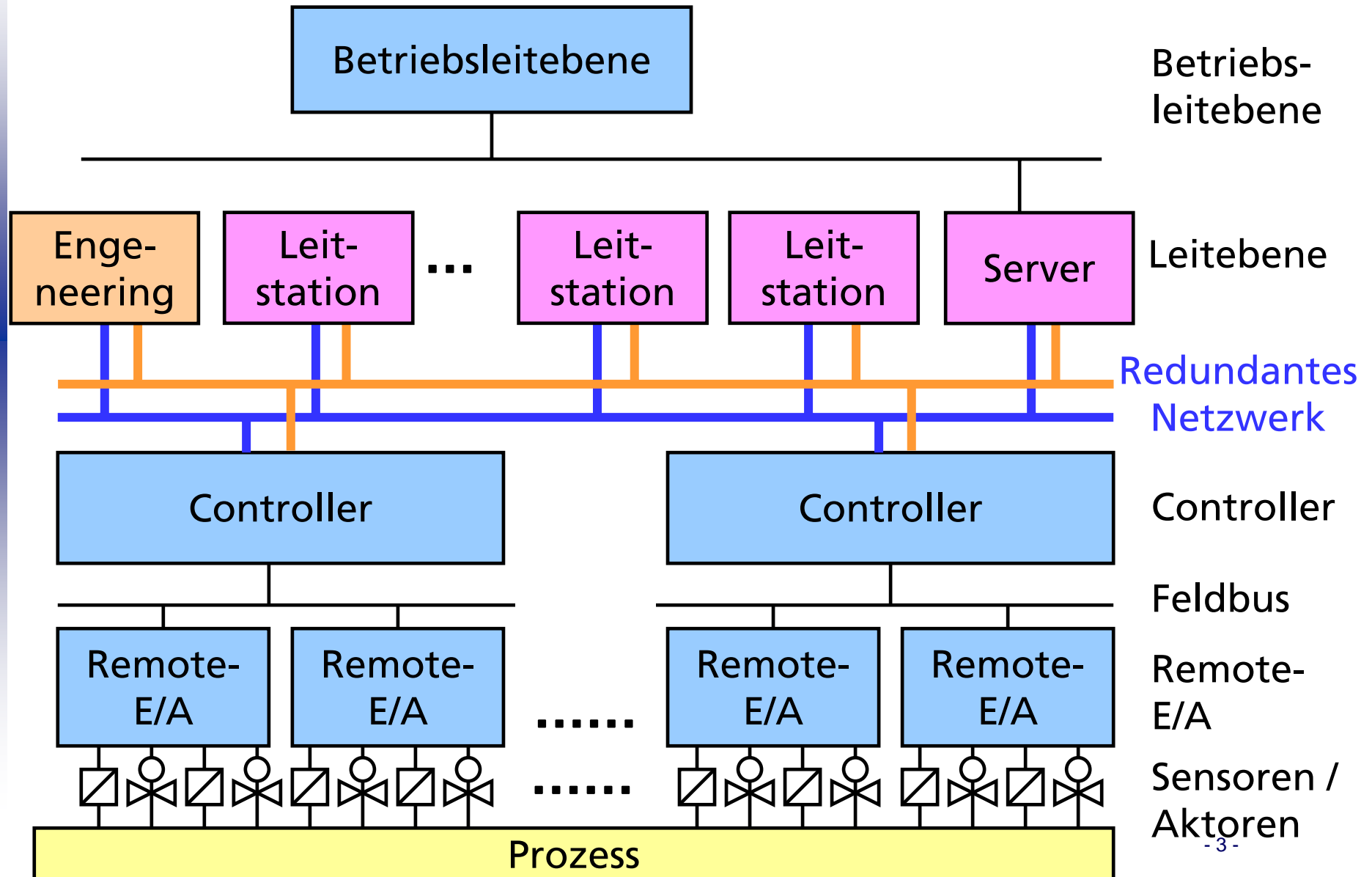
University of Applied Sciences and Arts



Prof. Dr.-Ing.  
Karl-Heinz Niemann

- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ Kostenanalyse
- ◆ Ausfallverhalten
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

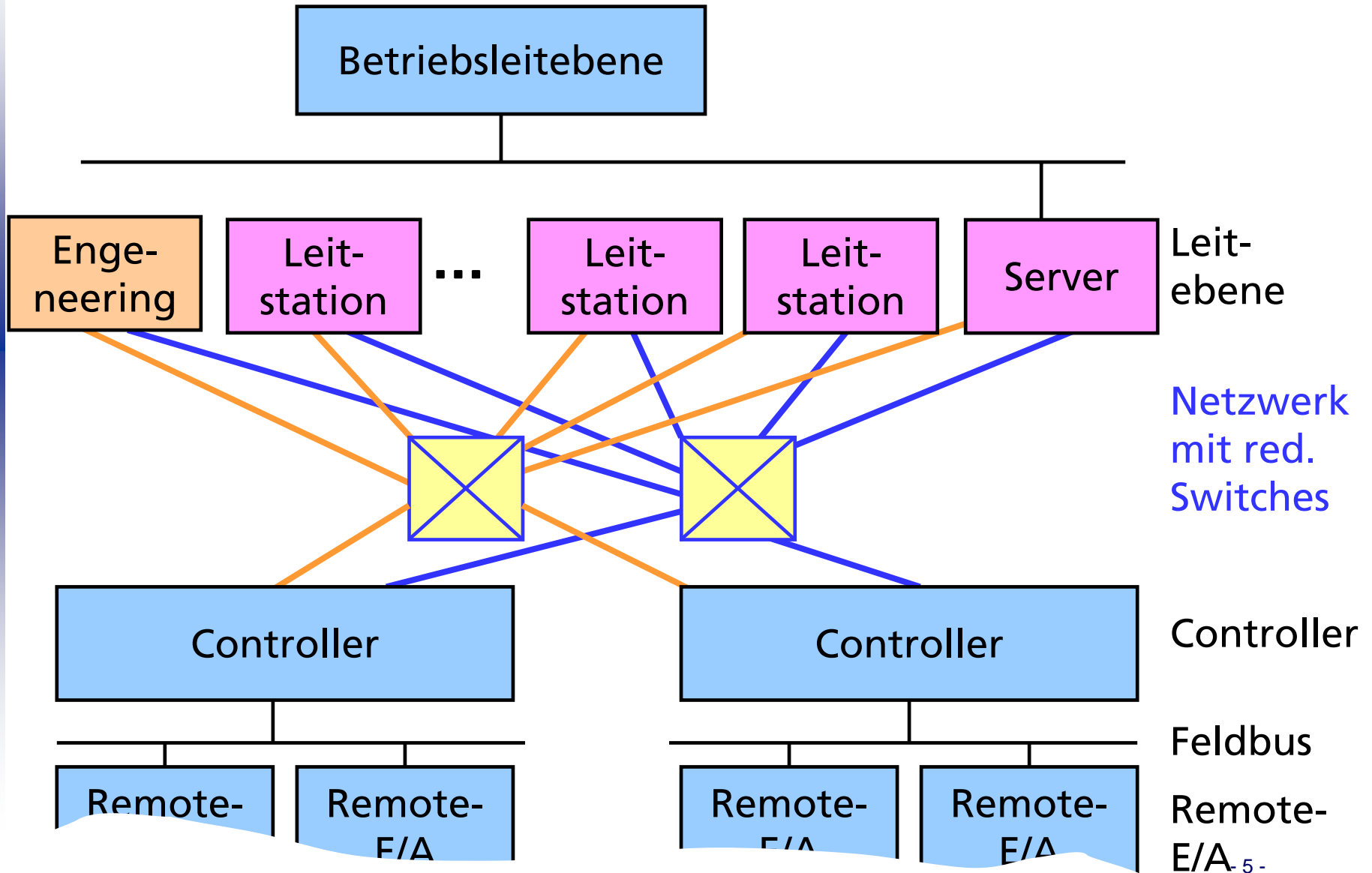
# Klassische Darstellung Systemstruktur



# Wandel der Netzwerkstrukturen

- ◆ Viele Topologiebilder von Automatisierungssystemen zeigen heute noch immer das redundante Netzwerkkabel, so wie es seit vielen Jahren üblich ist.
- ◆ Der Einsatz geschwichteter Netzwerke führt faktisch jedoch zu anderen Topologien.
- ◆ Die Planer automatisierungstechnischer Anlagen haben häufig die Wahl zwischen verschiedenen Netzwerktopologien, welche spezifische Vor- und Nachteile aufweisen.
- ◆ Dieser Beitrag soll dem Planer für Anlagen der Prozessautomatisierung einfache, nachvollziehbare Hinweise über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Topologien geben, ohne dass aufwendige Berechnungen erforderlich werden.

# Systemstruktur mit redundanten Switches



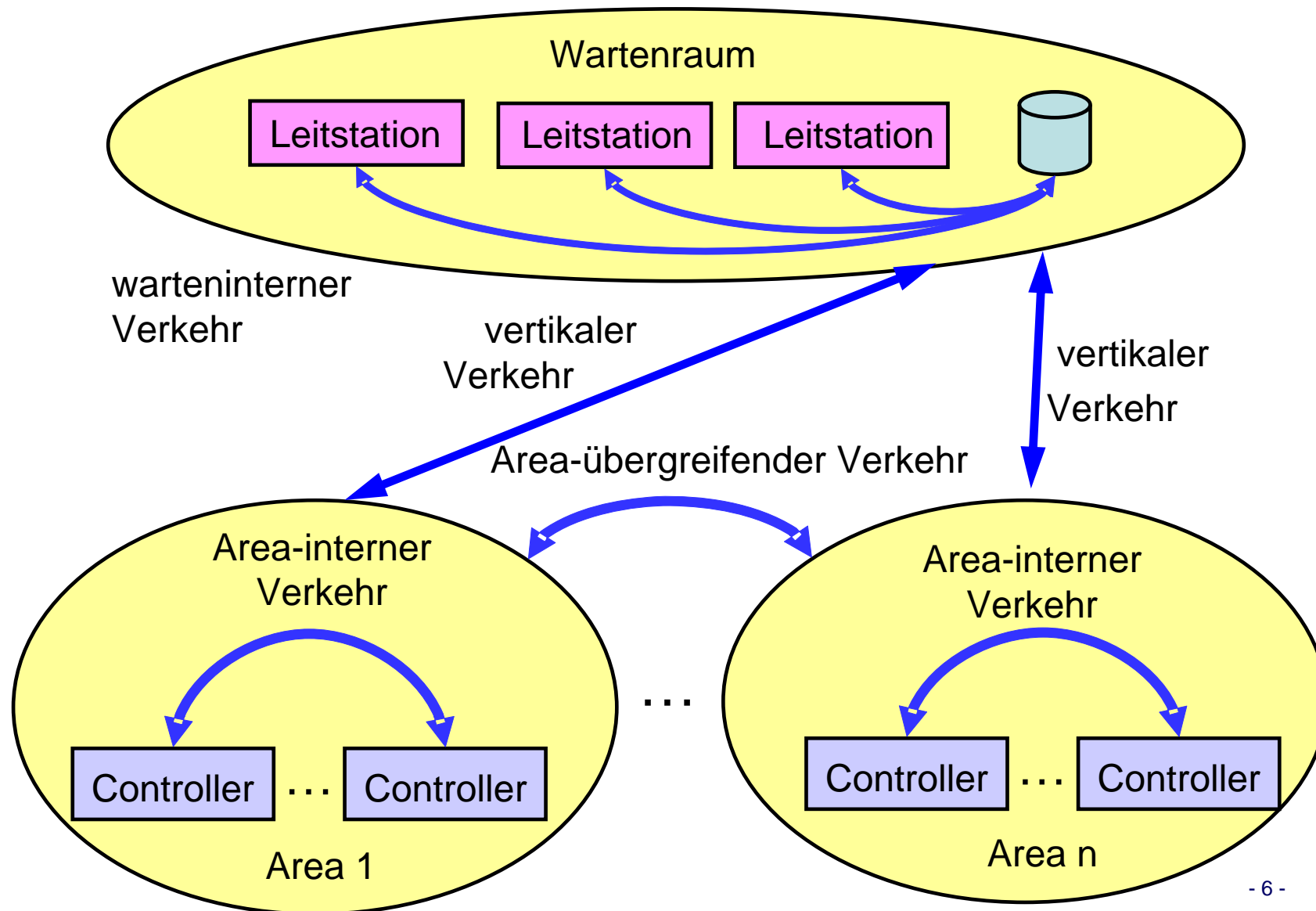
Netzwerk  
mit red.  
Switches

Controller

Feldbus

Remote-  
E/A-  
5-

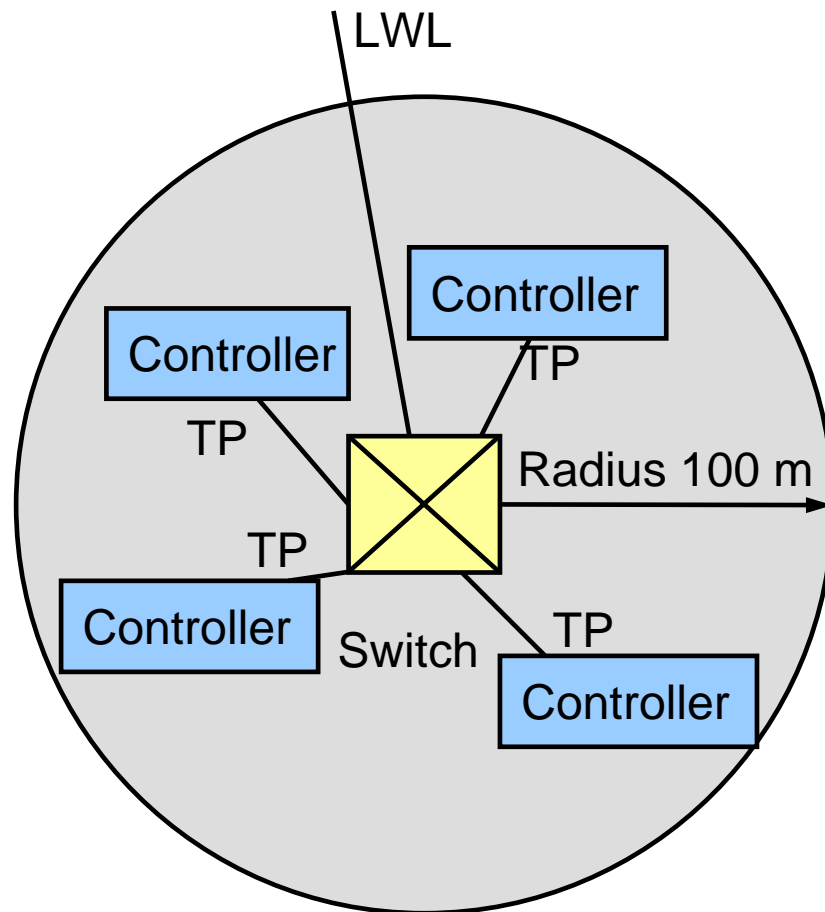
# Nachrichtenaufkommen in einer Anlage



# Datenverkehrsarten in einer Anlage

- ◆ **Warteninterner Verkehr**
  - ◆ Datenverkehr innerhalb der Leitwarte, z. B. Zugriff auf Server die Prozess- und Trenddaten zwischenspeichern.
- ◆ **Vertikaler Verkehr**
  - ◆ Hierbei handelt es sich um die Nachrichtenübertragung von den Controllern zur Leitebene, z. B. für die Übermittlung von Werten zur Anzeigen auf den Leitstationen, Alarmen, Datenübertragung für Bedieneingriffe, Trenddaten.
- ◆ **Area-interner Verkehr**
  - ◆ Dies ist Verkehr, bei dem Controller innerhalb einer Area (Automatisierungsinsel) Daten untereinander austauschen. Man spricht hier auch von Lateralkommunikation oder Peer-to-Peer-Kommunikation.
- ◆ **Area-übergreifender Verkehr**
  - ◆ Dies ist der Datenverkehr, der über Areas (Automatisierungsinseln) hinweg erfolgt.

# Physikalische Grenzen



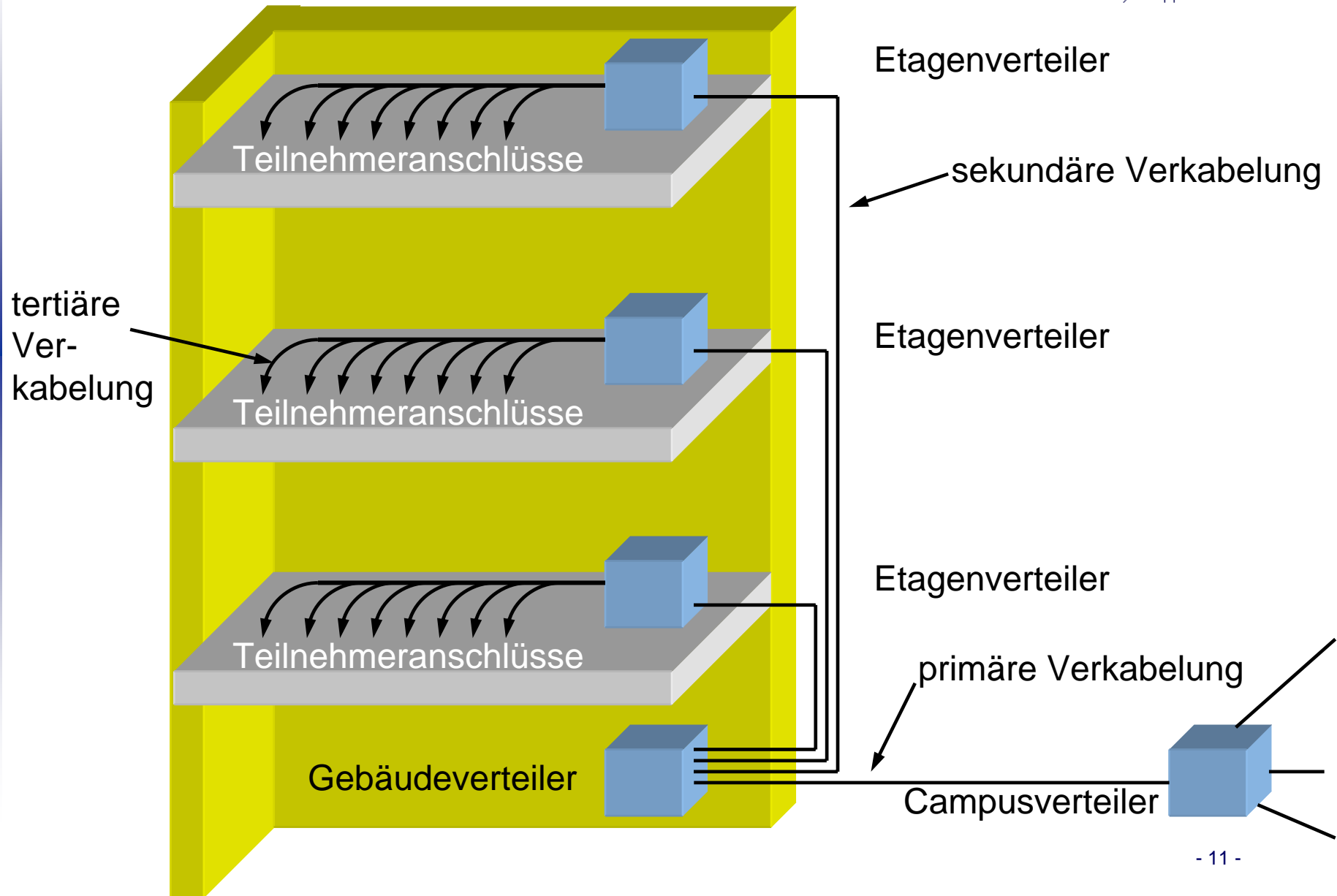
- ◆ Twisted-Pair-Verkabelung (TP) ist auf eine Länge von 100 m beschränkt.
- ◆ Größere Entfernungen werden üblicherweise mit Lichtwellenleiter (LWL) überbrückt.
- ◆ In der Praxis findet man häufig eine Verkabelung mit twisted Pair innerhalb von Schaltschränken oder Automatisierungseinseln, während die Schaltschränke selber über Glasfaserstrecken mit anderen Anlagenteilen verbunden werden.

- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ Kostenanalyse
- ◆ Ausfallverhalten
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

# Strukturierte Verkabelung im Bürobereich

- ◆ Im Bürobereich hat sich schon seit langem die strukturierte Verkabelung gemäß EN 50173 durchgesetzt. Diese Norm ist aus dem ISO Standard 11801 abgeleitet.
- ◆ Hier wird ein hierarchisches System bestehend aus primärer, sekundärer und tertiärer Verkabelung mit entsprechenden aktiven Verteilerknoten (Switches) beschrieben.
- ◆ Primäre und sekundäre Verkabelung sind häufig in Glasfaser, die tertiäre Verkabelung ist häufig in Kupfer ausgeführt.

# Strukturierte Verkabelung im Bürobereich

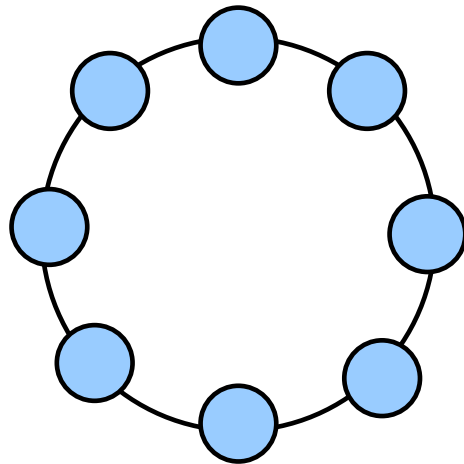


# Verkabelungsrichtlinien im Automatisierungsbereich

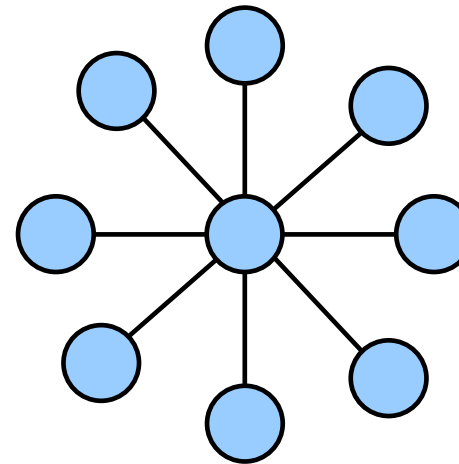
- ◆ Im Automatisierungsbereich existieren zur Zeit eine Reihe von Empfehlungen zur Strukturierung von Automatisierungsnetzen:
  - ◆ IEC 61918 Digital data communications for measurement and control –Installation of communication networks in industrial control systems. (Working Draft Status)
  - ◆ pr EN 50173-3:2006 Normentwurf Anwendungsneutrale Kommunikationskabelanlagen, Teil 3: Industriell genutzte Gebäude
  - ◆ IAONA-Installation Guideline
  - ◆ PROFINET Installation Guideline
  - ◆ Ethernet IP Planning and Installation Guideline
  - ◆ Fieldbus Foundation HSE Installation (Paper von J. Berge)
- ◆ Die oben genannten Richtlinien lassen dem Anwender zum überwiegenden Teil verschiedene Netzwerktopologien zur Auswahl.

- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ Kostenanalyse
- ◆ Ausfallverhalten
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

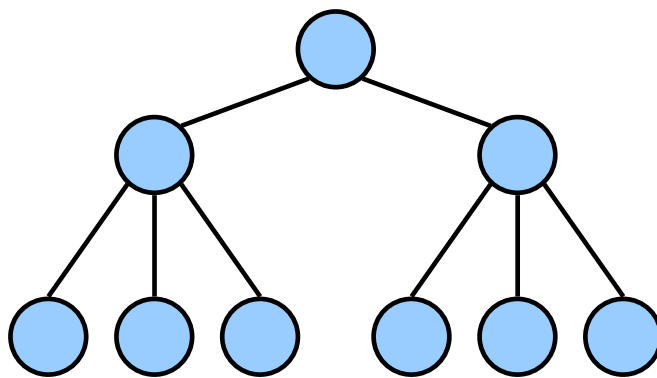
# Mögliche Netzwerktopologien (1)



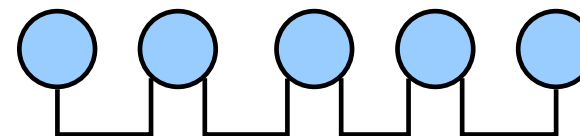
Ring



Stern

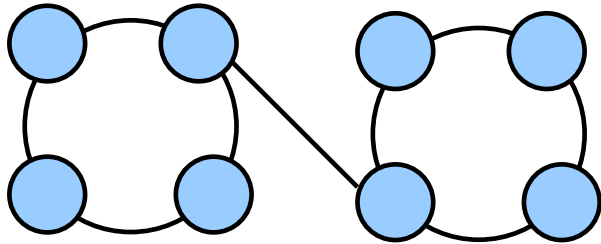


Baum

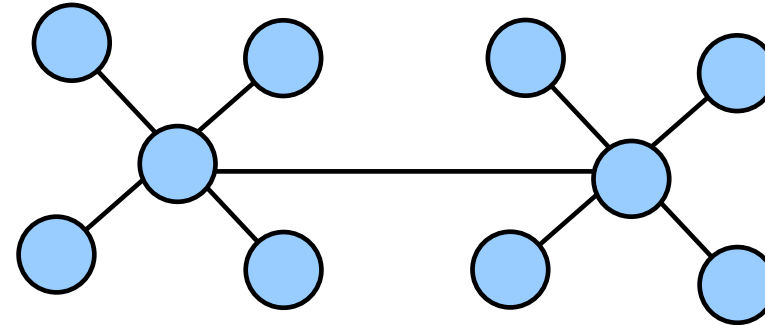


Linie

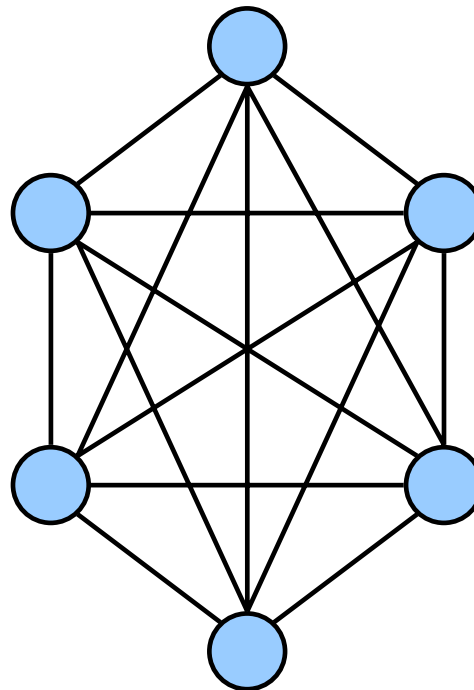
# Mögliche Netzwerktopologien (2)



verbundene Ringe



Verbundene Sterne



vermaschte  
Topologie

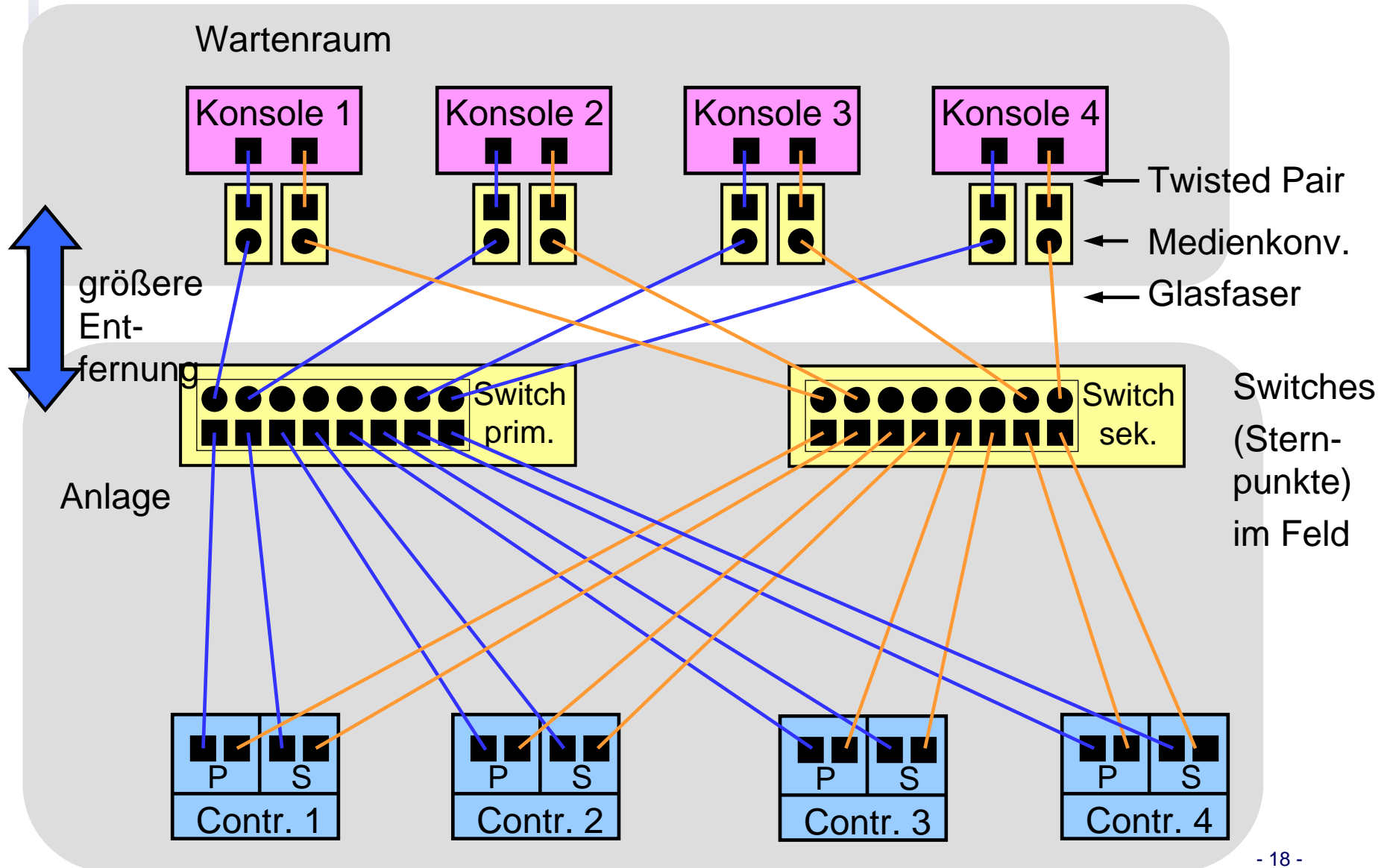
# Abbildung der Topologien auf die Struktur einer Anlage

- ◆ Im Folgenden sollen die generischen Netztopologien auf die Struktur einer Anlage in der Prozessautomatisierung abgebildet werden.
- ◆ Hierbei werden die folgenden Annahmen über die Verwendung von Kupfer- und Glasfaserstrecken getroffen:
  - ◆ Einsatz von Kupferstrecken innerhalb eines Anlagenbereiches (Area) bei Entfernungen bis 100 m.
  - ◆ Einsatz von Kupferstrecken im Wartenraum.
  - ◆ Einsatz von Glasfaserstrecken zwischen den Anlagenbereichen und von den Anlagenbereichen zum Wartenraum.

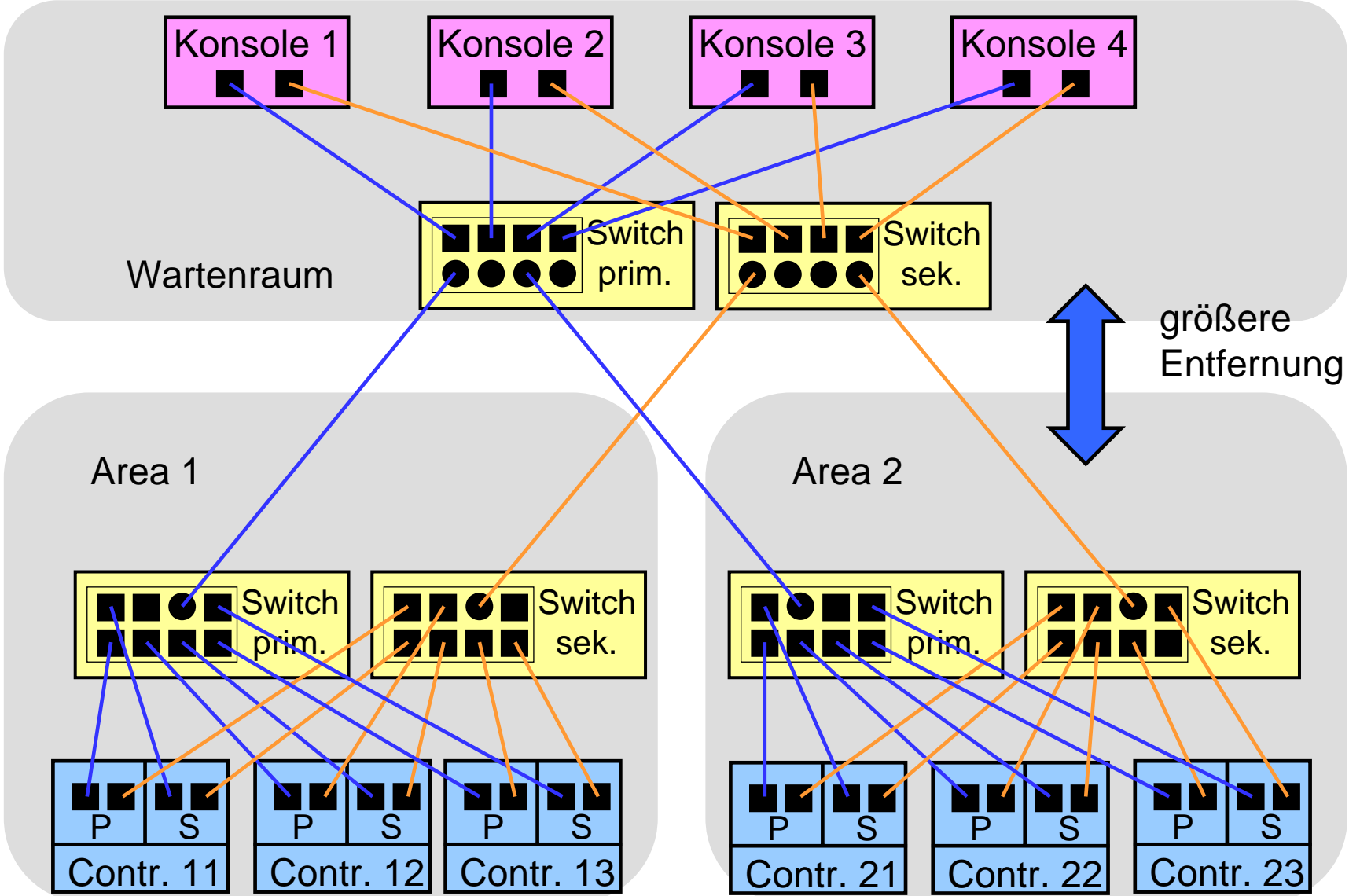
# Erläuterung der verwendeten Symbole

|   |                              |
|---|------------------------------|
|  | Netzwerkverbindung allgemein |
|  | Primäres Netzwerk            |
|  | Sekundäres Netzwerk          |
|  | Twisted Pair Port (Kupfer)   |
|  | Glasfaserport                |

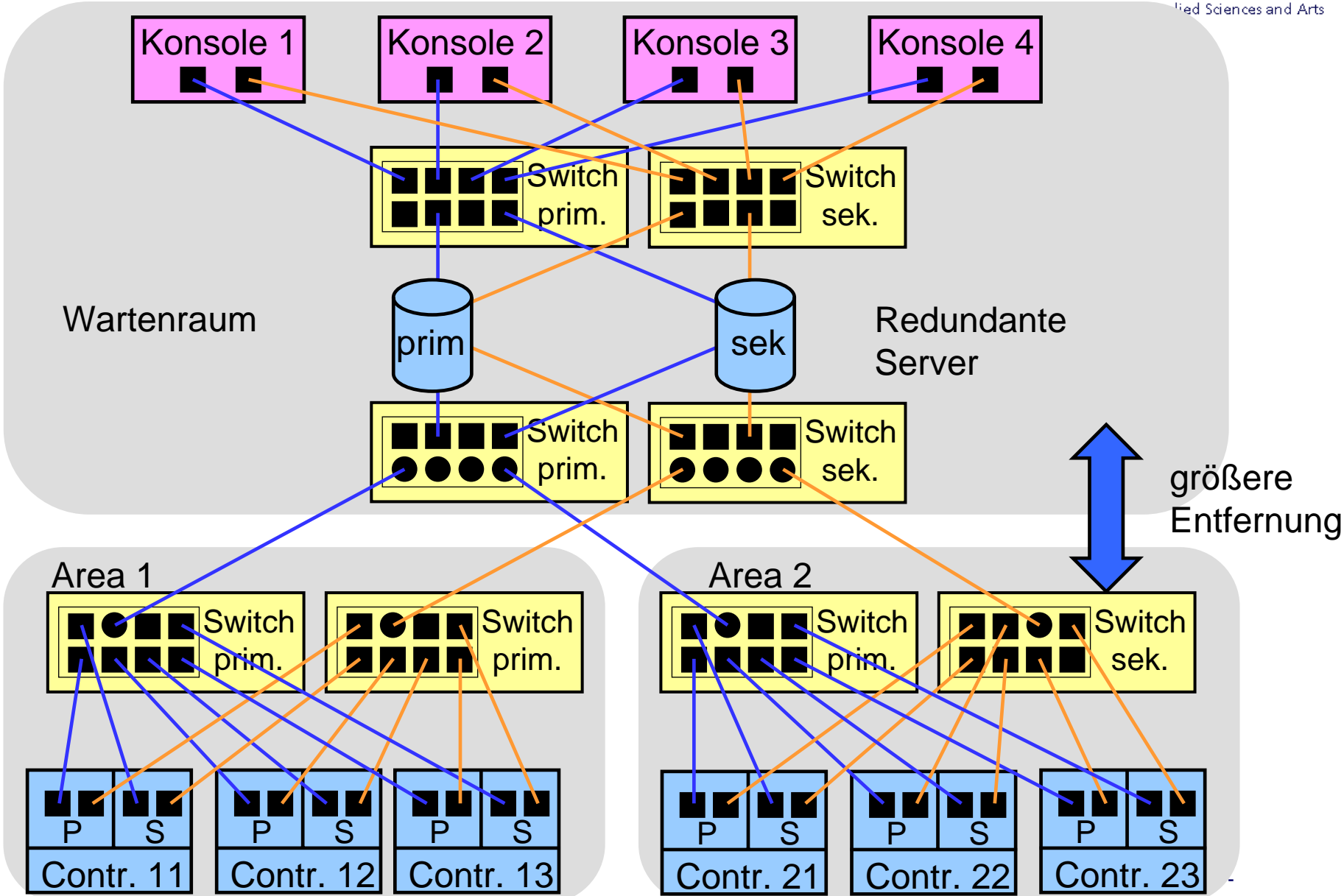
# Sterntopologie



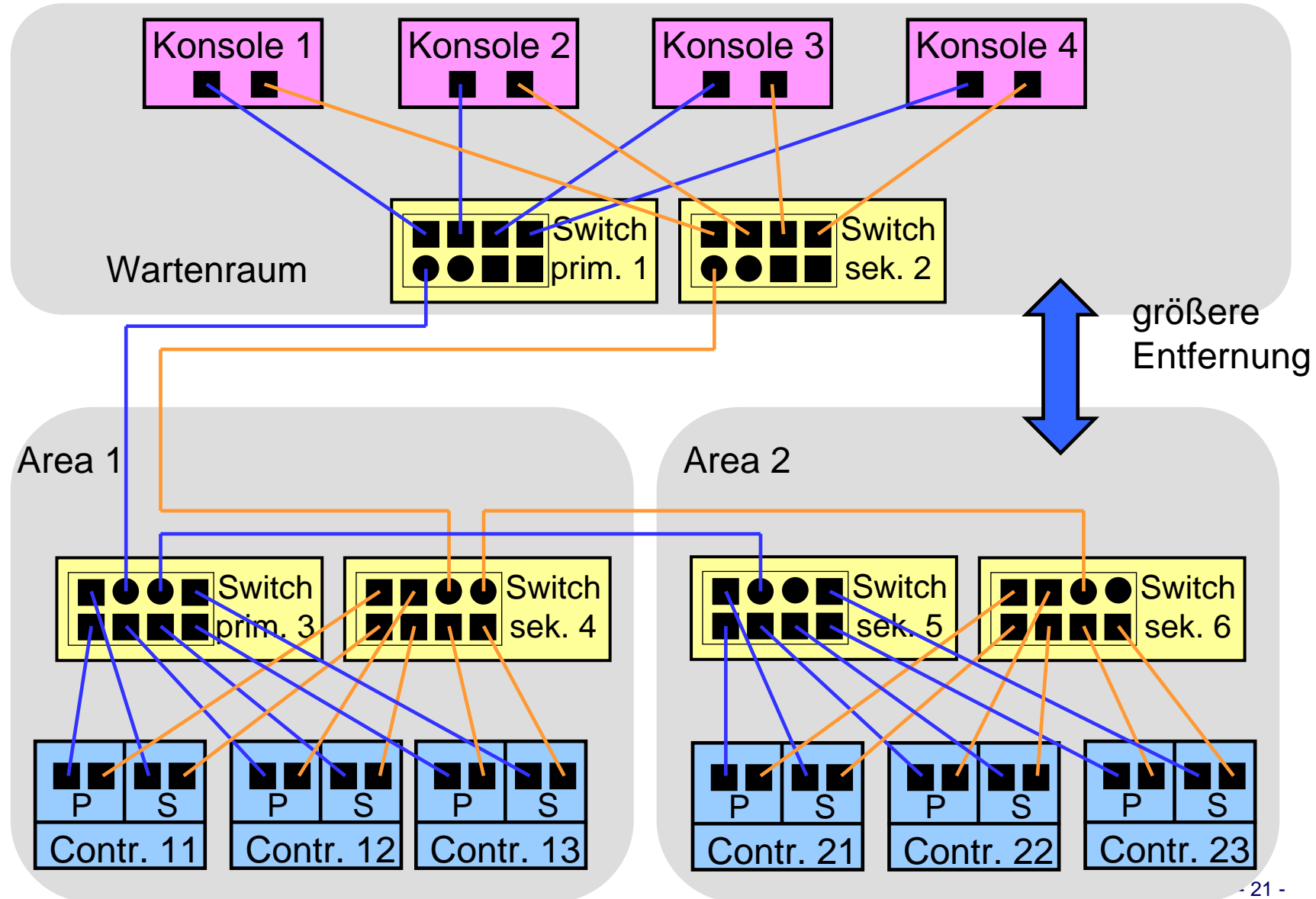
# Baumtopologie



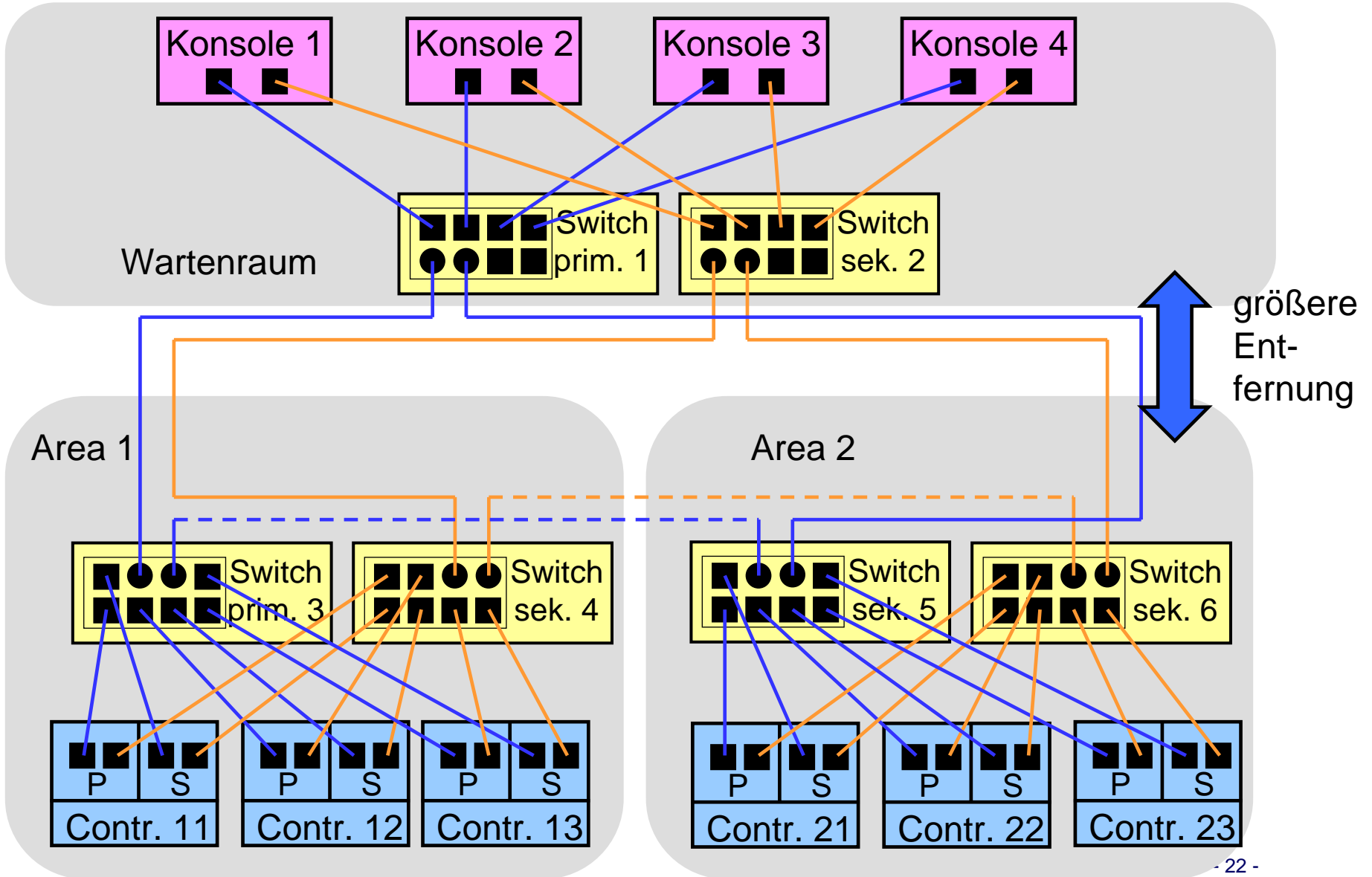
# Baumtopologie mit zentralen Servern



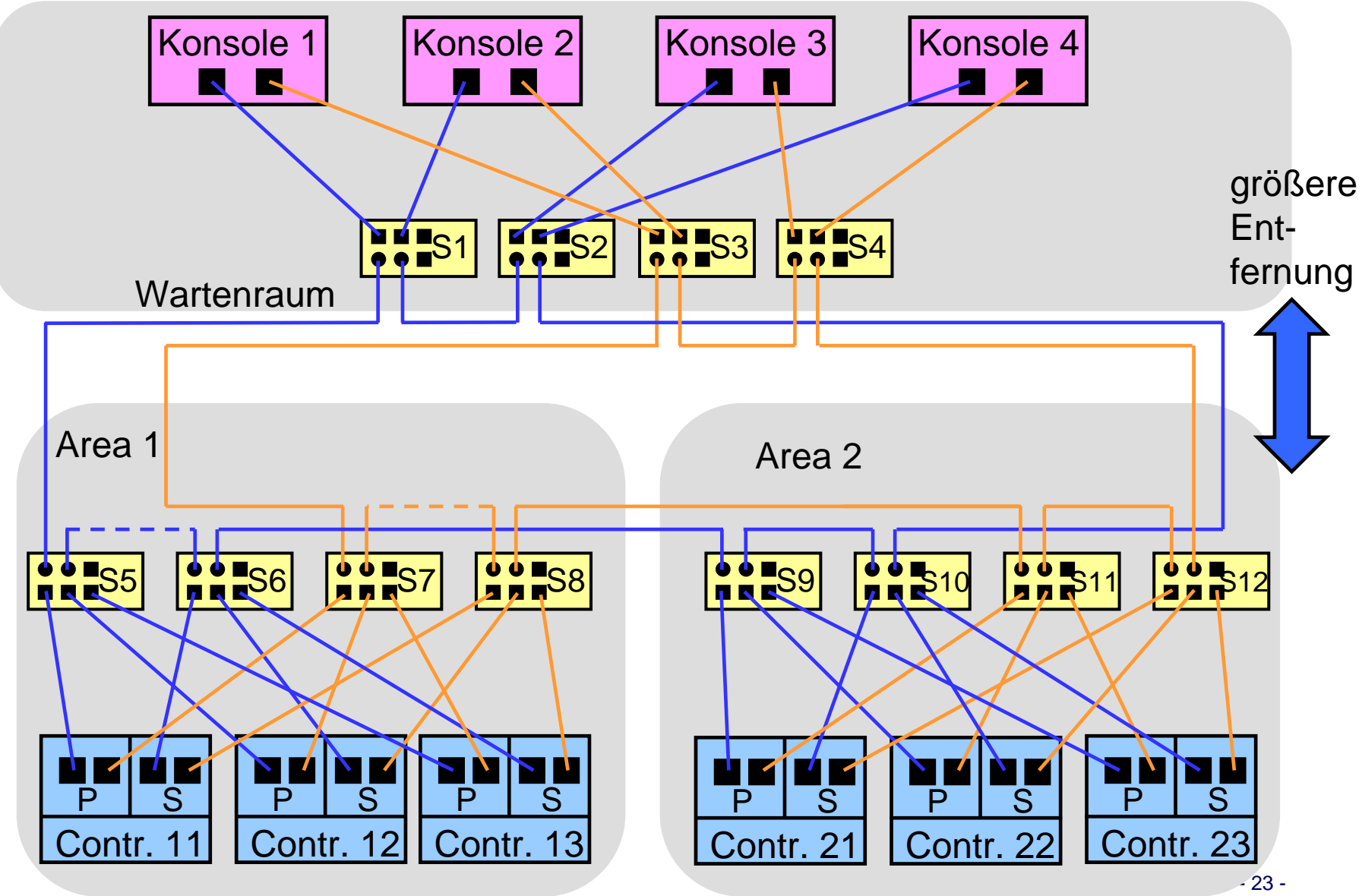
# Linientopologie



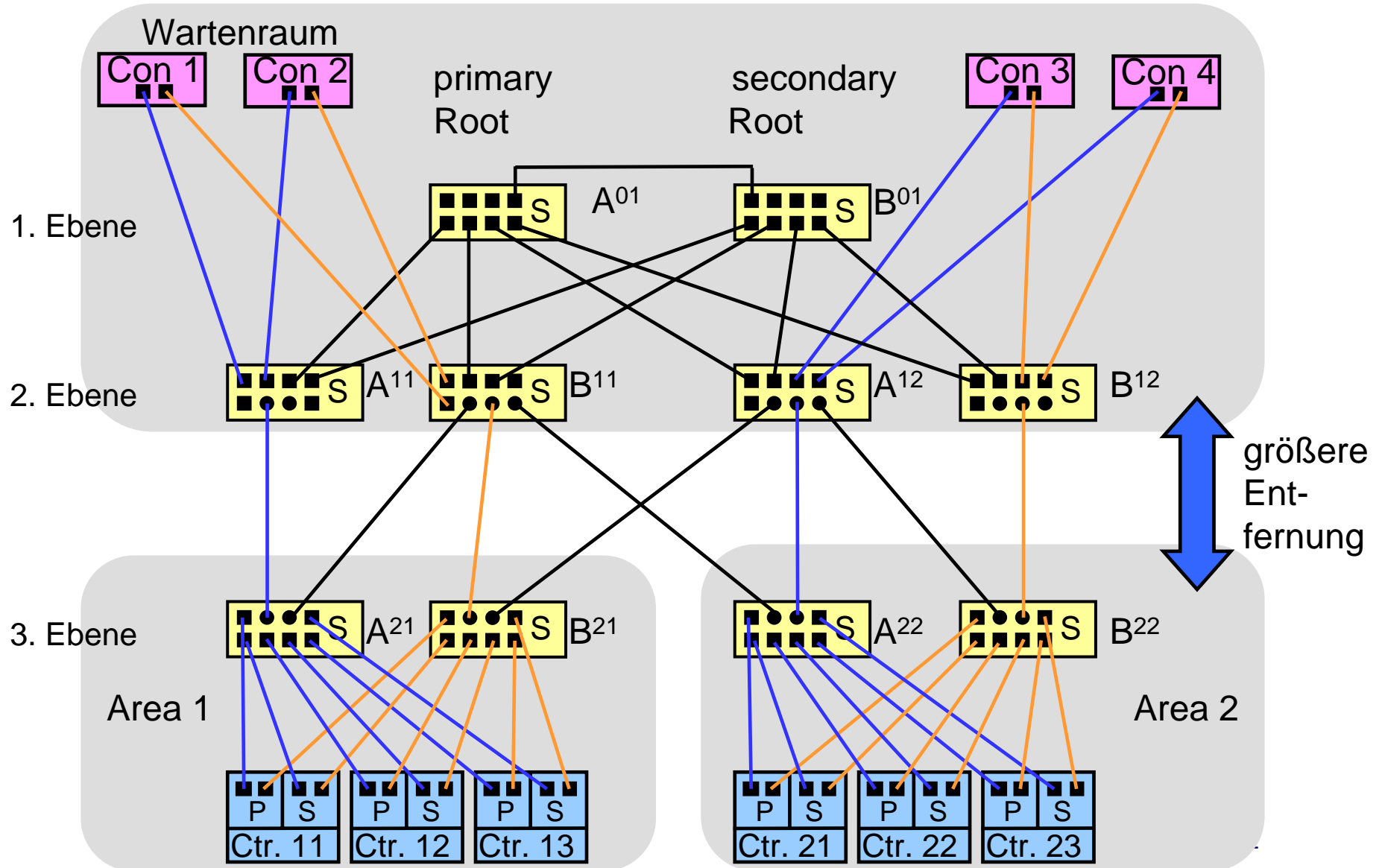
# Ringtopologie



# Erweiterte Ringtopologie



# Vermaschte Topologie



# Inhalt

- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ **Kostenanalyse**
- ◆ Ausfallverhalten
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

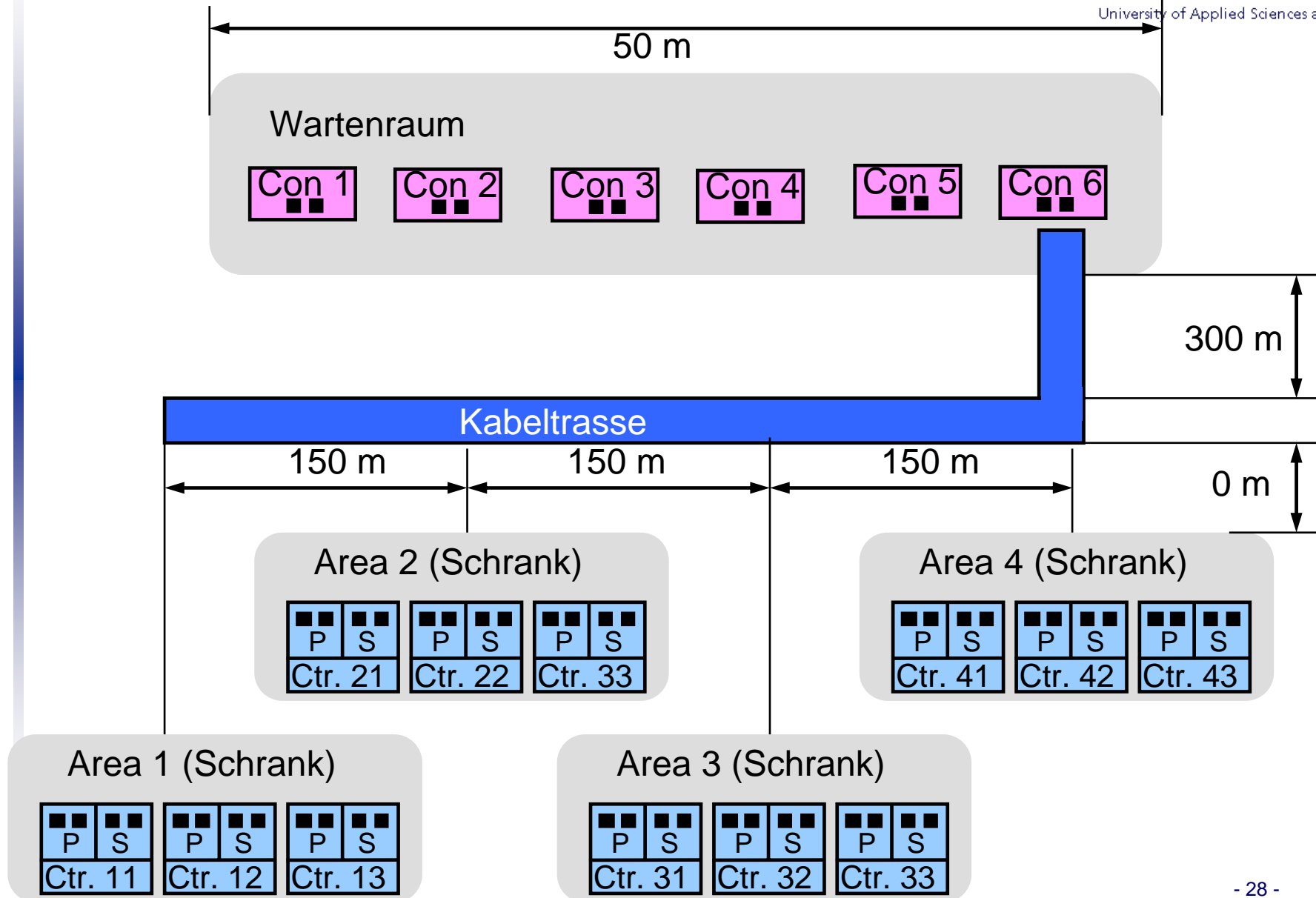
# Kostenanalyse (1)

- ◆ Für den Vergleich der topologiebedingten relativen Kosten werden drei Beispielanlagen unterschiedlicher Größe definiert.
- ◆ Zunächst wird eine Anlage mittlerer Größe betrachtet:
  - ◆ 6 Operator Konsolen in einem Wartenraum.
  - ◆ 12 redundante Controller verteilt auf 4 Automatisierunginseln.
- ◆ Problem bei der Kostenbetrachtung ist die Abhängigkeit der Kosten von:
  - ◆ der gewählten Produktfamilie der Switches und des Herstellers
  - ◆ der Anzahl Ports pro Switch der gewählten Produkte
  - ◆ der Modularität der gewählten Switches
  - ◆ der Höhe der Lohnanteile für die Verlegung und den Anschluss der unterschiedlichen Kabeltypen (Twisted Pair / Glasfaser)
  - ◆ der Anzahl Adern in einem Glasfaserkabel

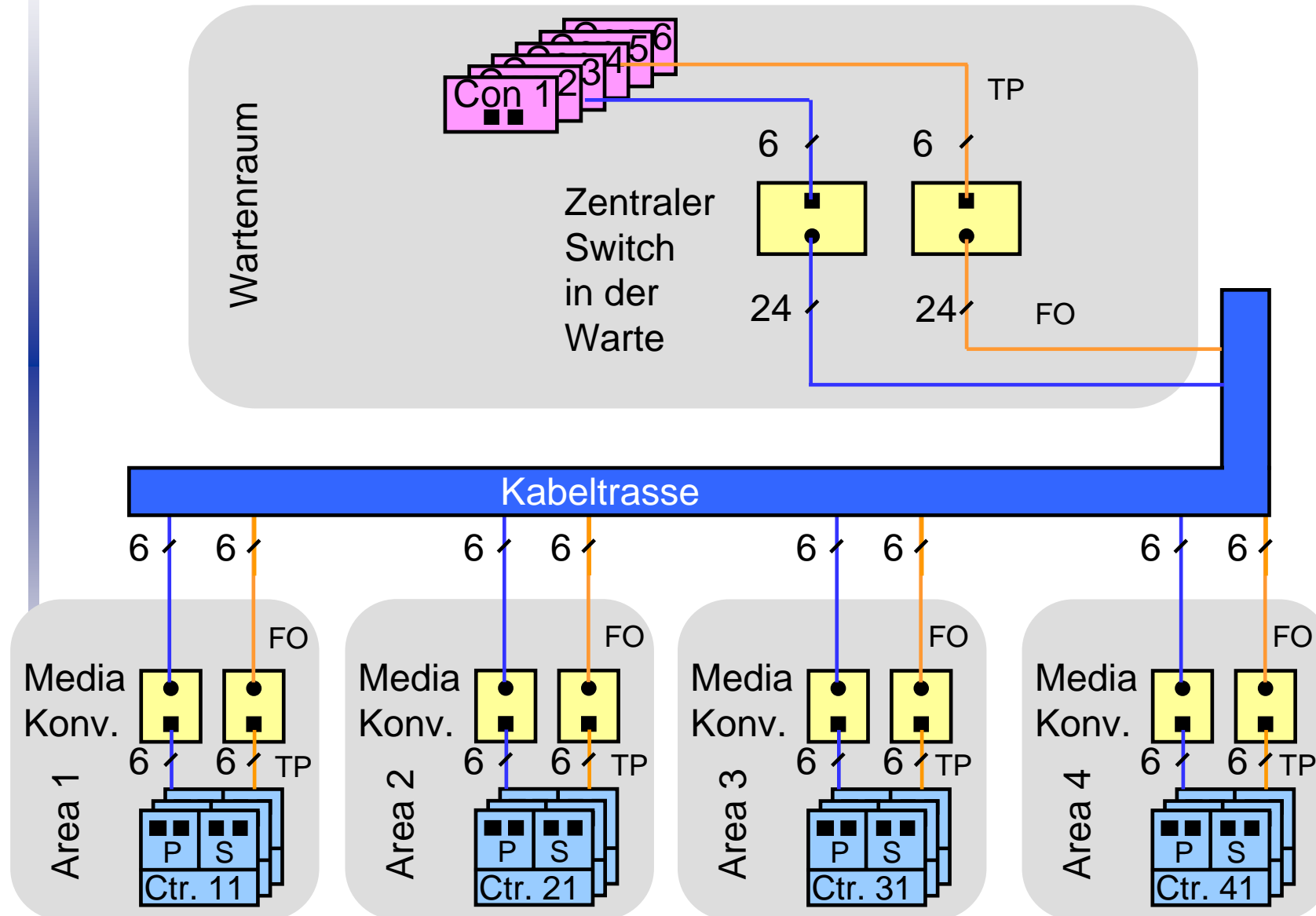
# Kostenanalyse (2)

- ◆ Um eine möglichst große Unabhängigkeit von den genannten Kostenfaktoren zu erhalten, wird mit den folgenden Annahmen gearbeitet:
  - ◆ Die Kalkulation basiert auf der Anzahl der benötigten Ports (getrennte Betrachtung für Kupfer und Glasfaser)
  - ◆ Es wird mit einem Preisverhältnis Kosten Glasfaserport zu Kosten TP-Port von 2:1 gerechnet.
    - ◆ Dieser Wert lässt sich im Kalkulationsschema einfach an andere Gegebenheiten anpassen.
  - ◆ Es wird mit einem Preisverhältnis Kosten Glasfaserkabel zu Kosten Kupferkabel von 2:1 gerechnet. Hierin enthalten sind ggf. erforderlich Aufwand für Spleißboxen, Spleißarbeiten, etc.
  - ◆ Die Kalkulation geht davon aus, dass die Switches mit beliebigen Kombinationen von Glasfaser und Twisted-Pair-Ports ausgerüstet werden können.
  - ◆ Basiskosten für das Switch-Chassis werden nicht betrachtet, die entsprechenden Kosten werden anteilig den Portkosten zugerechnet.

# Beispieltopologie, mittelgroße Anlage



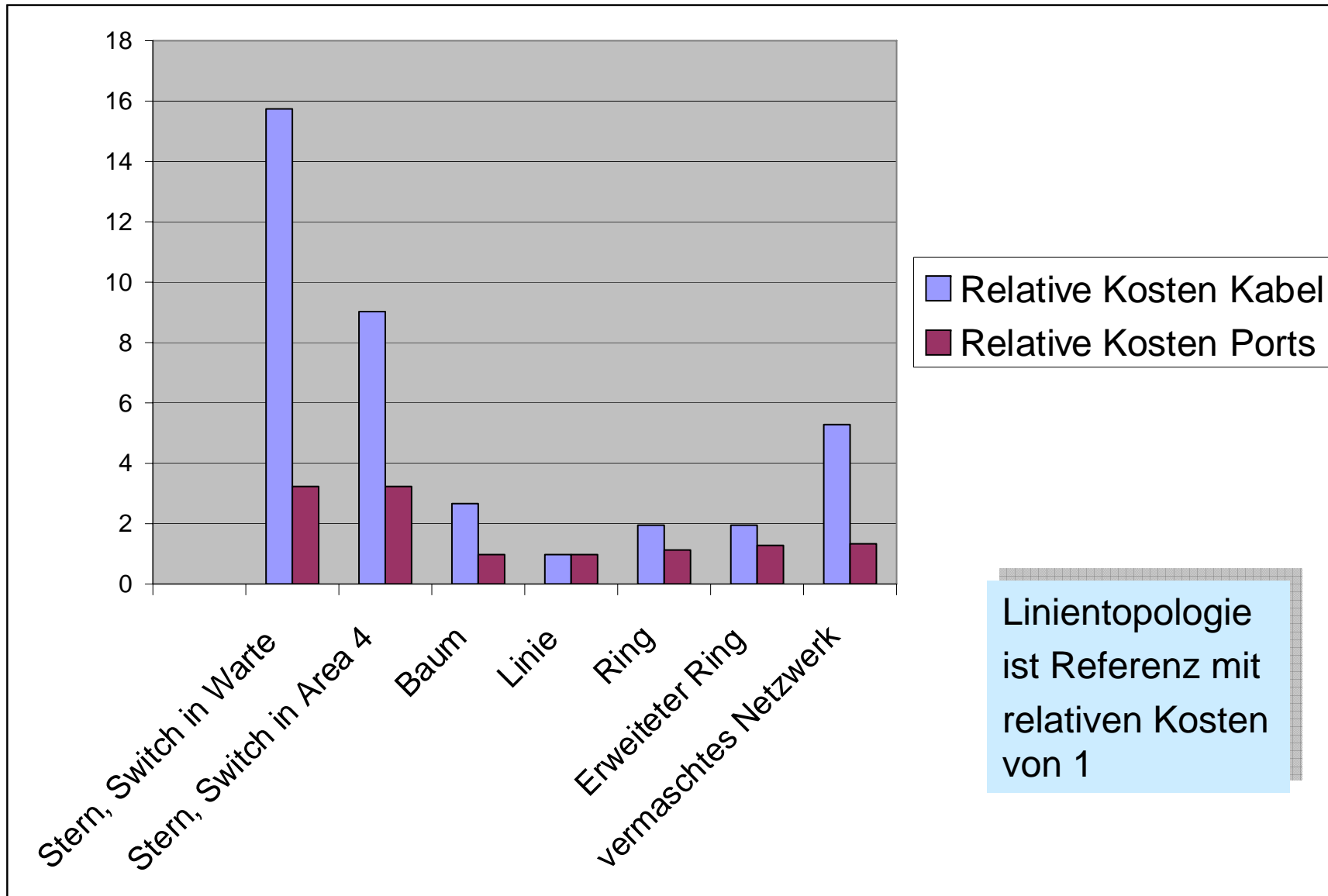
# Beispiel: Redundanter Stern mit Switch im Wartezimmer



# Rechenbeispiel für redundanten Stern mit Switch im Warterraum

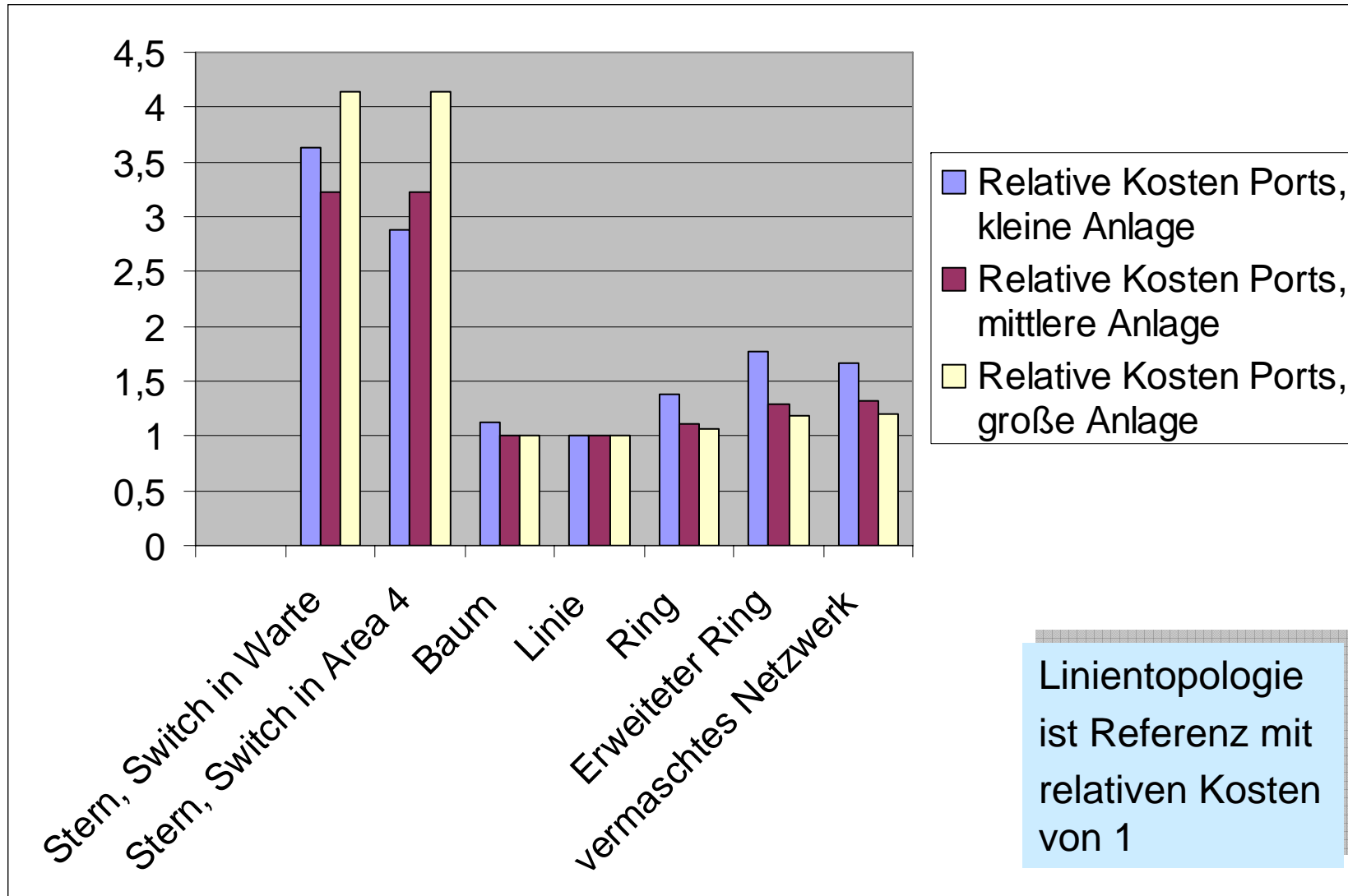
| Ort                        | Anzahl STP Ports | Anzahl FO Ports | STP Kabel / m | FO Kabel / m  |
|----------------------------|------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Wartenraum                 | 12               | 48              | 120           |               |
| Verkabelung Warte - Area 1 |                  |                 |               | 9.000         |
| Verkabelung Warte - Area 2 |                  |                 |               | 7.200         |
| Verkabelung Warte - Area 3 |                  |                 |               | 5.400         |
| Verkabelung Warte - Area 4 |                  |                 |               | 3.600         |
| Area 1                     | 12               | 12              | 24            |               |
| Area 2                     | 12               | 12              | 24            |               |
| Area 3                     | 12               | 12              | 24            |               |
| Area 4                     | 12               | 12              | 24            |               |
| <b>Total</b>               | <b>60</b>        | <b>96</b>       | <b>216</b>    | <b>25.200</b> |

# Relative Kosten mittelgroße Anlage

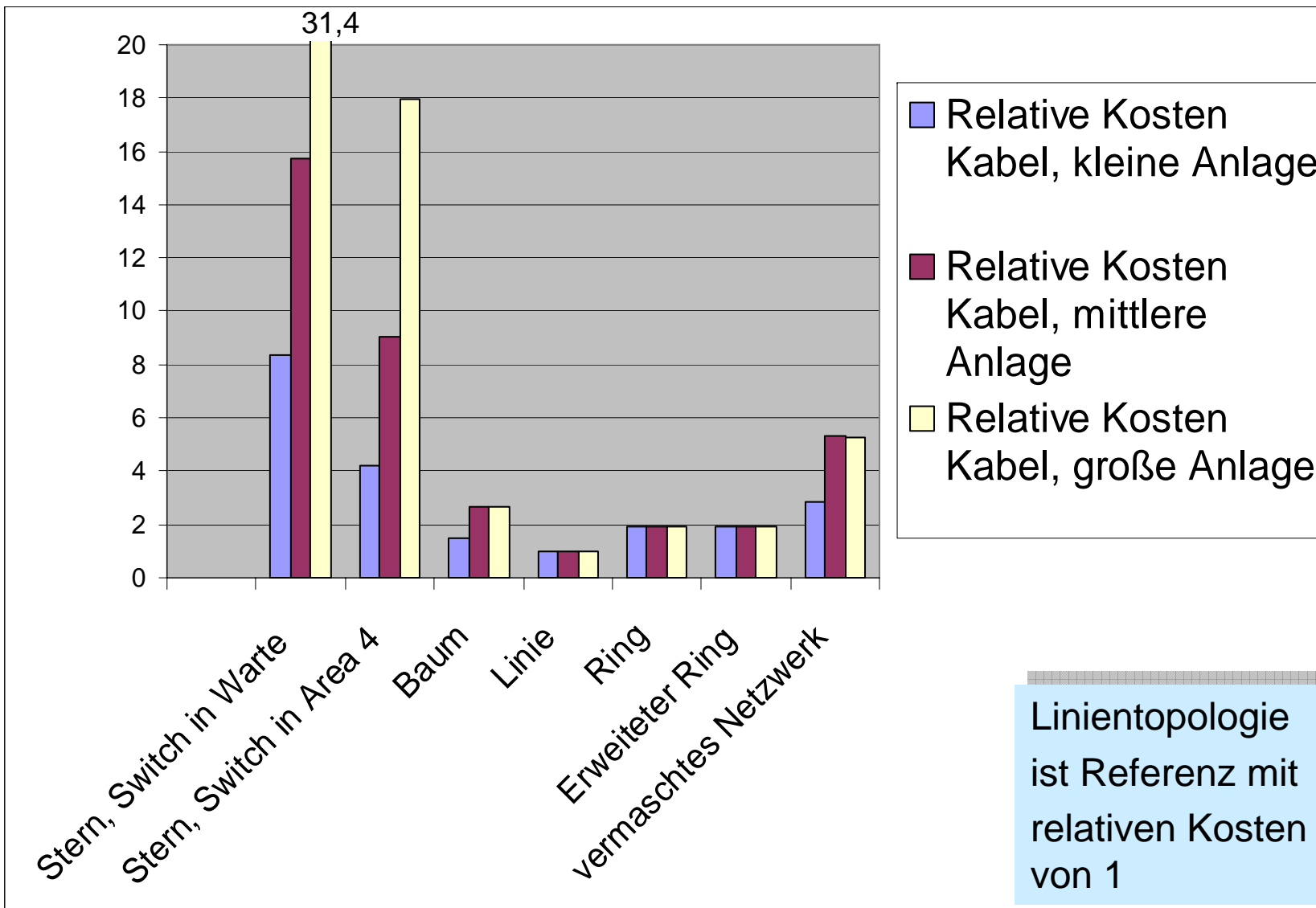


- ◆ Die vorgestellte Berechnung wurde für zwei weitere Anlagentypen durchgeführt:
  - ◆ Große Anlage mit 24 redundanten Controllern und 12 Leitstationen.
  - ◆ Kleine Anlage mit 6 Controllern und 3 Leitstationen.
- ◆ Die prinzipielle Kostenstruktur bleibt dabei im Wesentlichen erhalten.
- ◆ Bei der großen Anlage fallen naturgemäß bei der Sterntopologie und der vermaschten Topologie die Leitungskosten stärker ins Gewicht.

# Vergleich relative Portkosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße



# Vergleich relative Verkabelungskosten in Abhängigkeit von der Anlagengröße

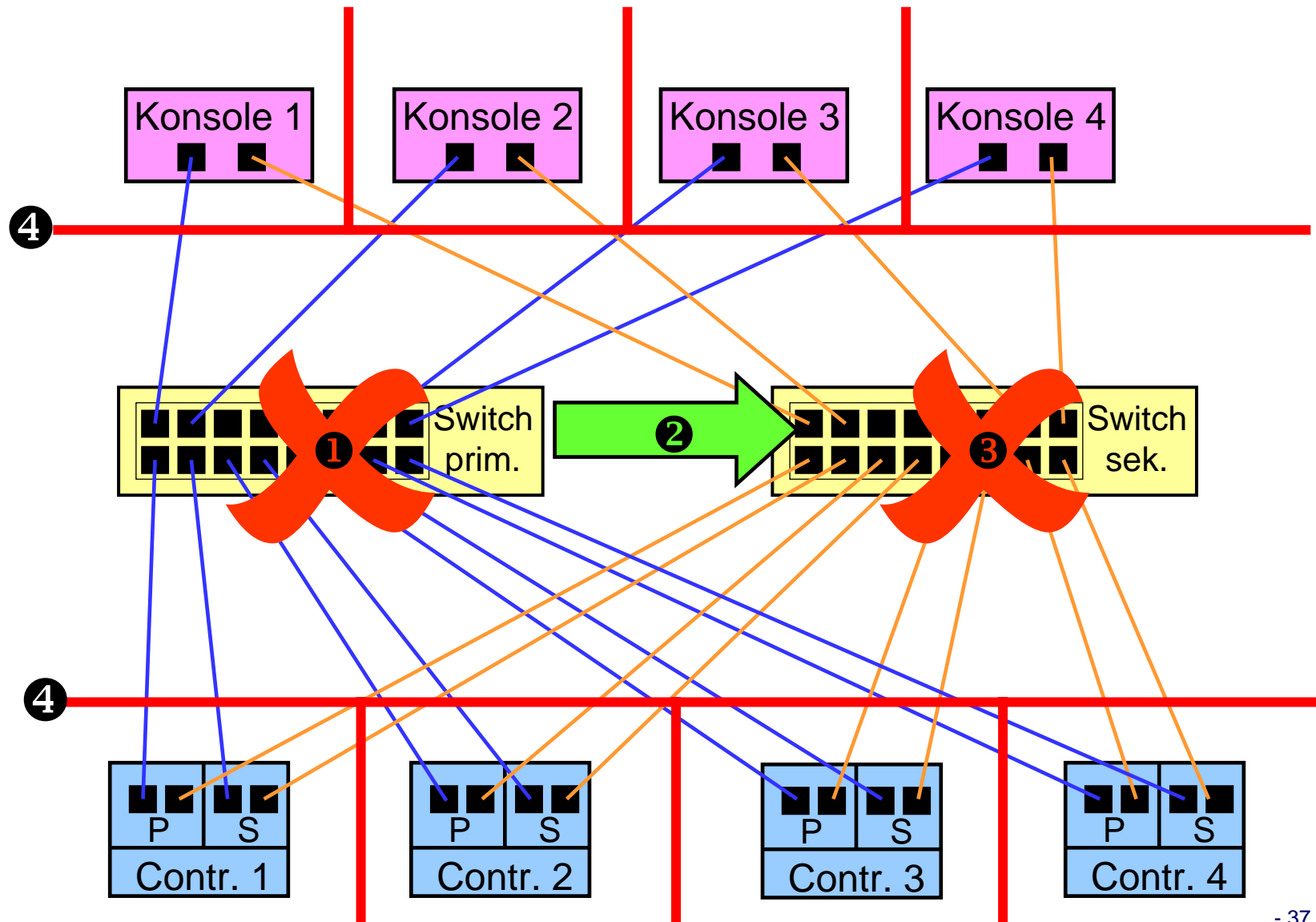


- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ Kostenanalyse
- ◆ **Ausfallverhalten**
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

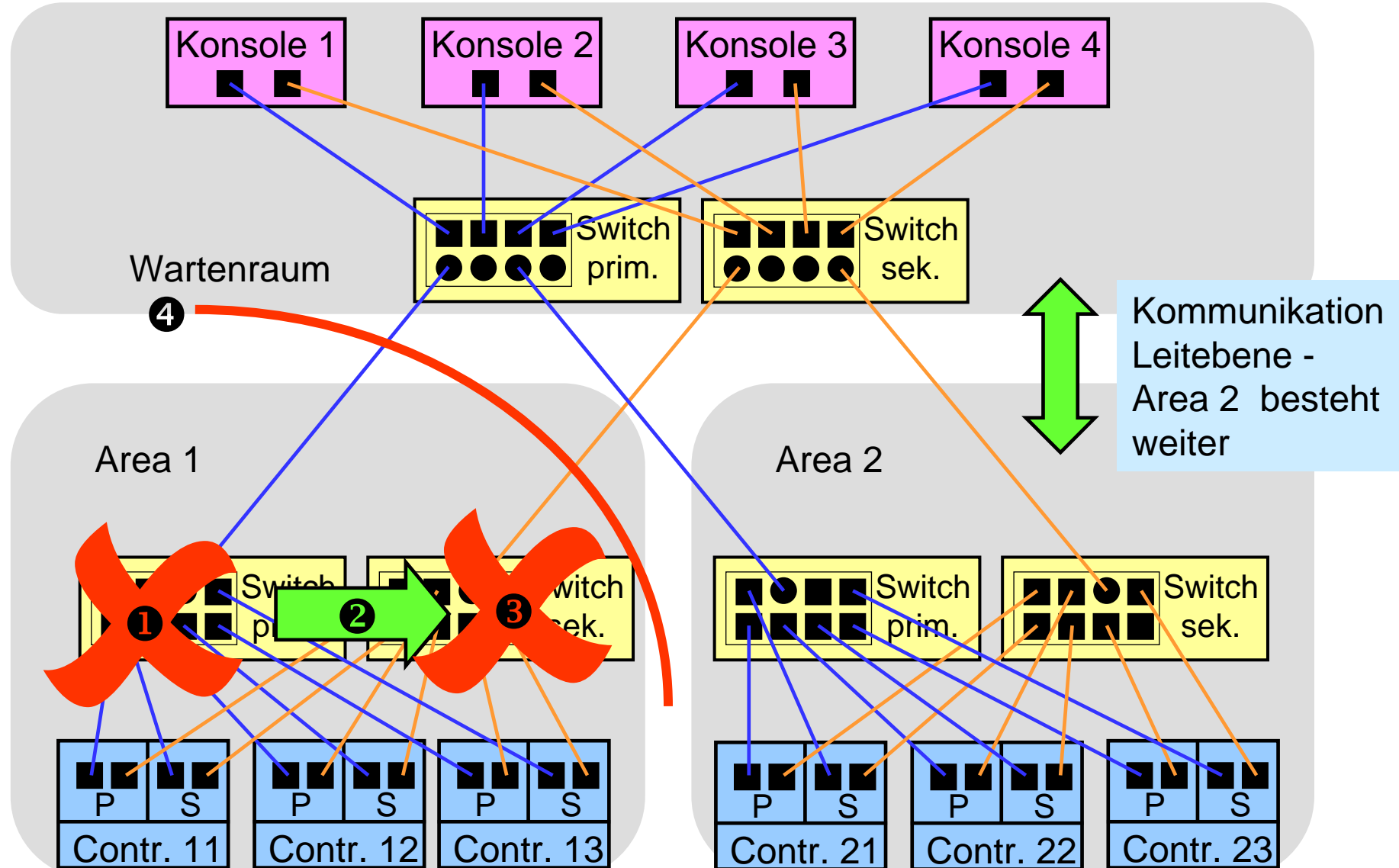
# Ausfallverhalten

- ◆ Sämtliche Betrachtungen gehen bisher von einem voll-redundanten System aus.
- ◆ Dies bedeutet:
  - ◆ Redundante Controller
  - ◆ Redundante Netzwerkanschlüsse an jedem der beiden Controller eines redundanten Paares
  - ◆ Redundante Netzwerk-Switches
  - ◆ Leitstationen mit redundanten Netzwerkanschlüssen
- ◆ Durch die redundante Auslegung des Netzwerkes kann man einen einfacher Ausfall eines Switches oder einer Netzwerkverbindung in jedem Fall beherrschen.
- ◆ Im Weiteren soll untersucht werden, wie sich die verschiedenen Netzwerktopologien bei mehrfachen Ausfällen verhalten.
  - ◆ Dabei wird jeweils ein Ausfall von Switches in Area 1 betrachtet. Für Ausfälle in anderen Areas, bzw. in der Warte gelten analoge Szenarien. Die Auswirkungen sind dabei vom Ausfallort abhängig.

# Ausfallverhalten Sterntopologie

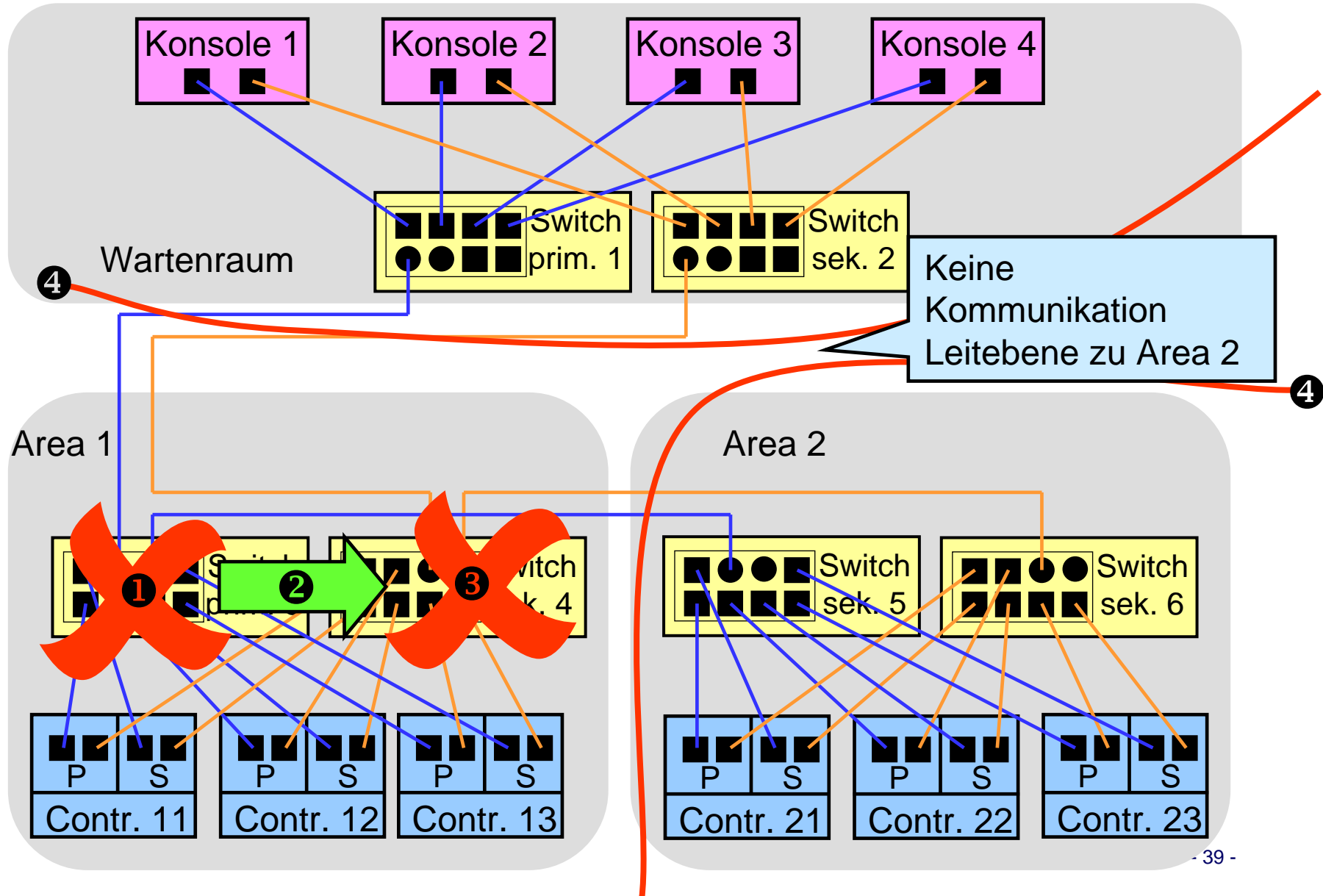


# Ausfallverhalten Baumtopologie

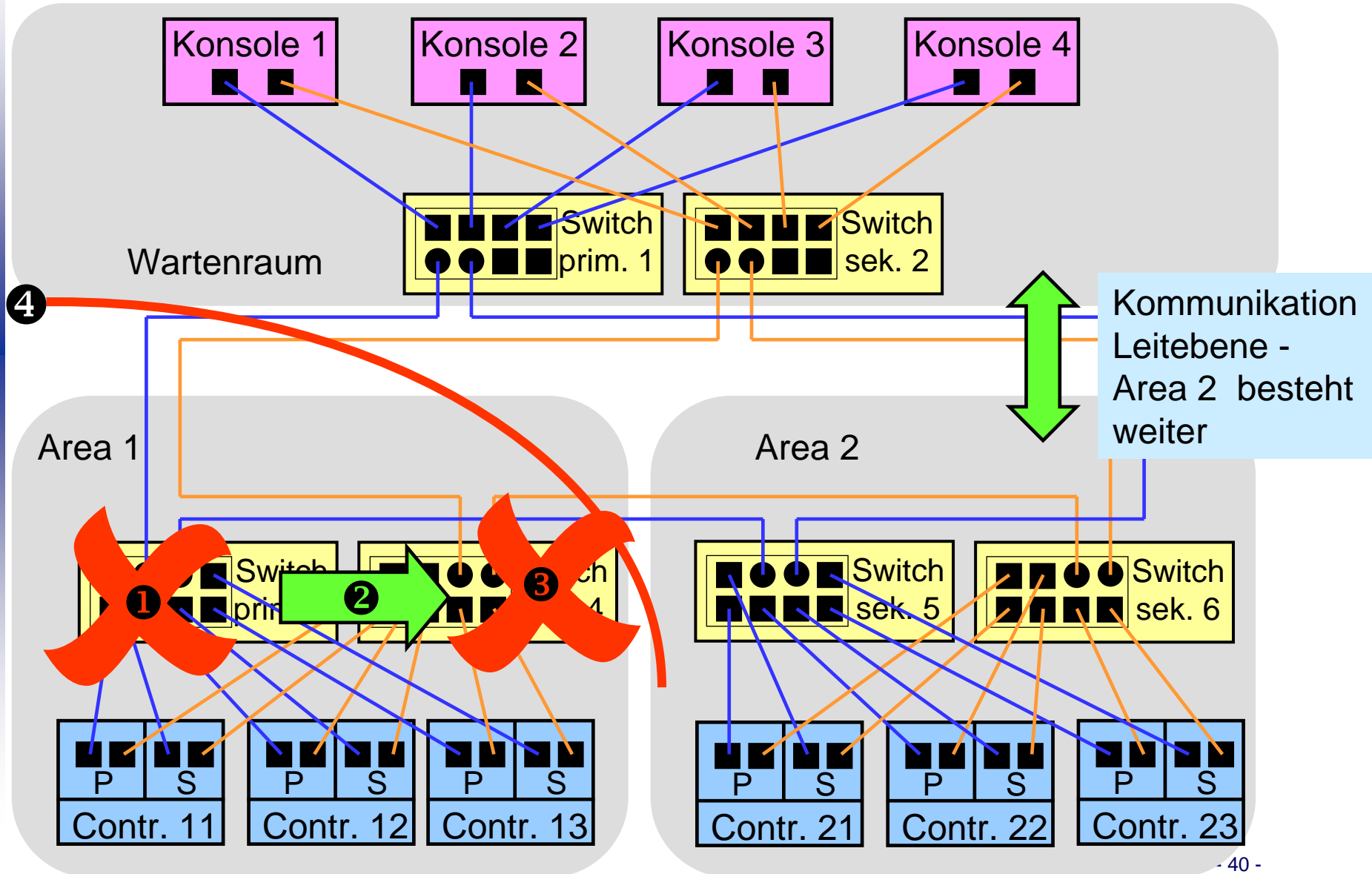


Kommunikation  
Leitebene -  
Area 2 besteht  
weiter

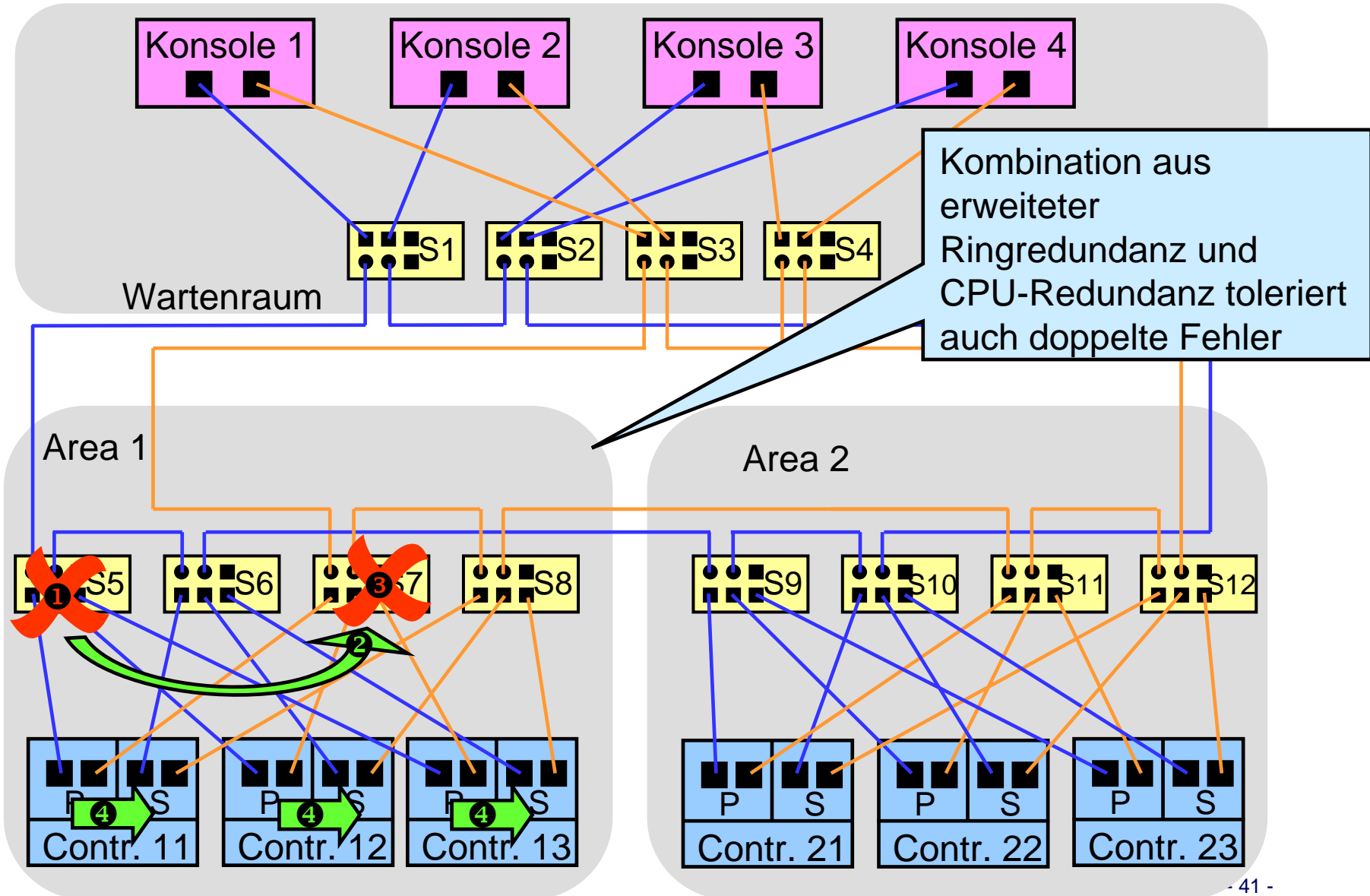
# Ausfallverhalten Linientopologie



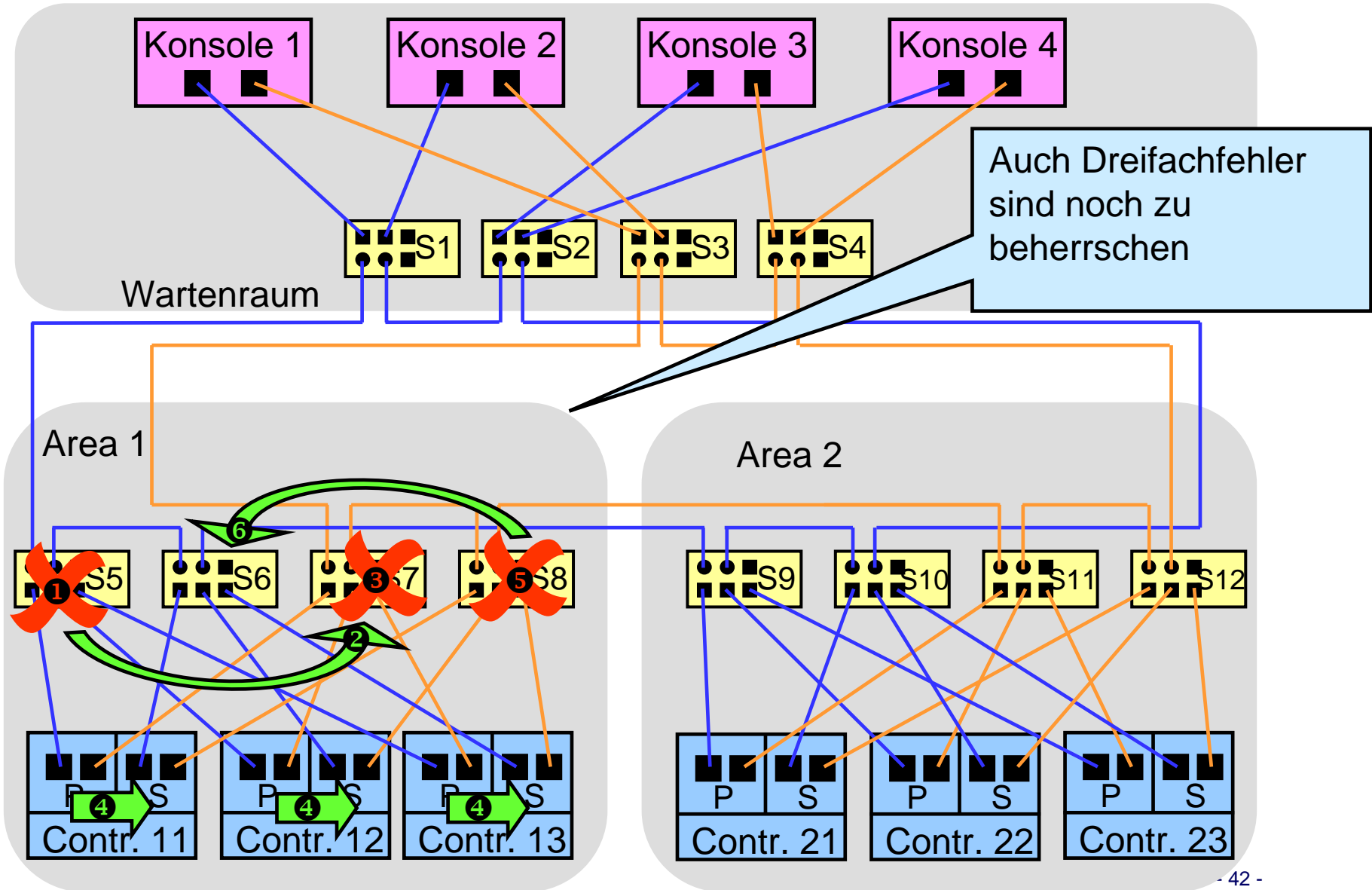
# Ausfallverhalten Ringtopologie



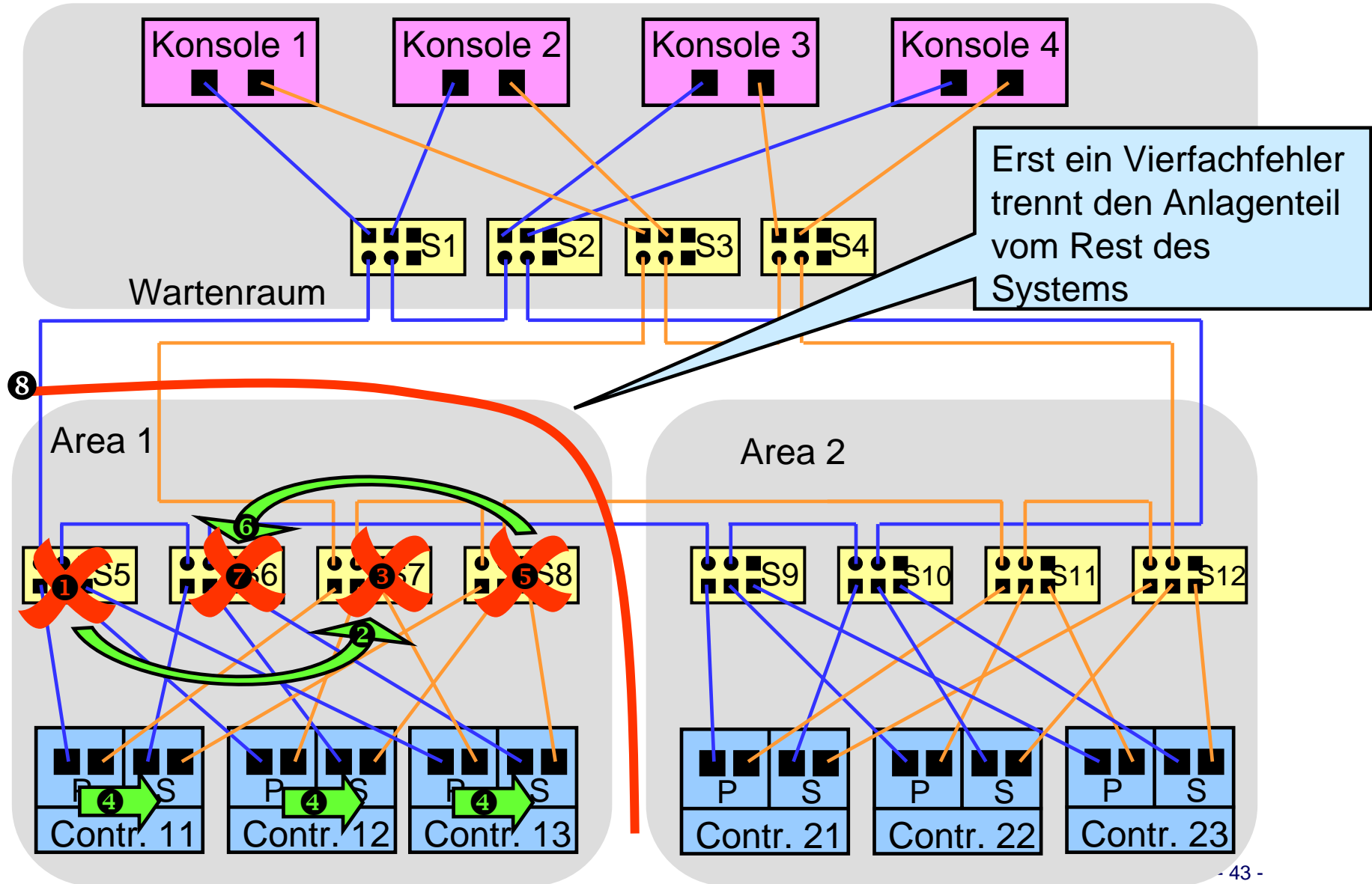
# Ausfallverhalten erweiterte Ringtopologie (1)



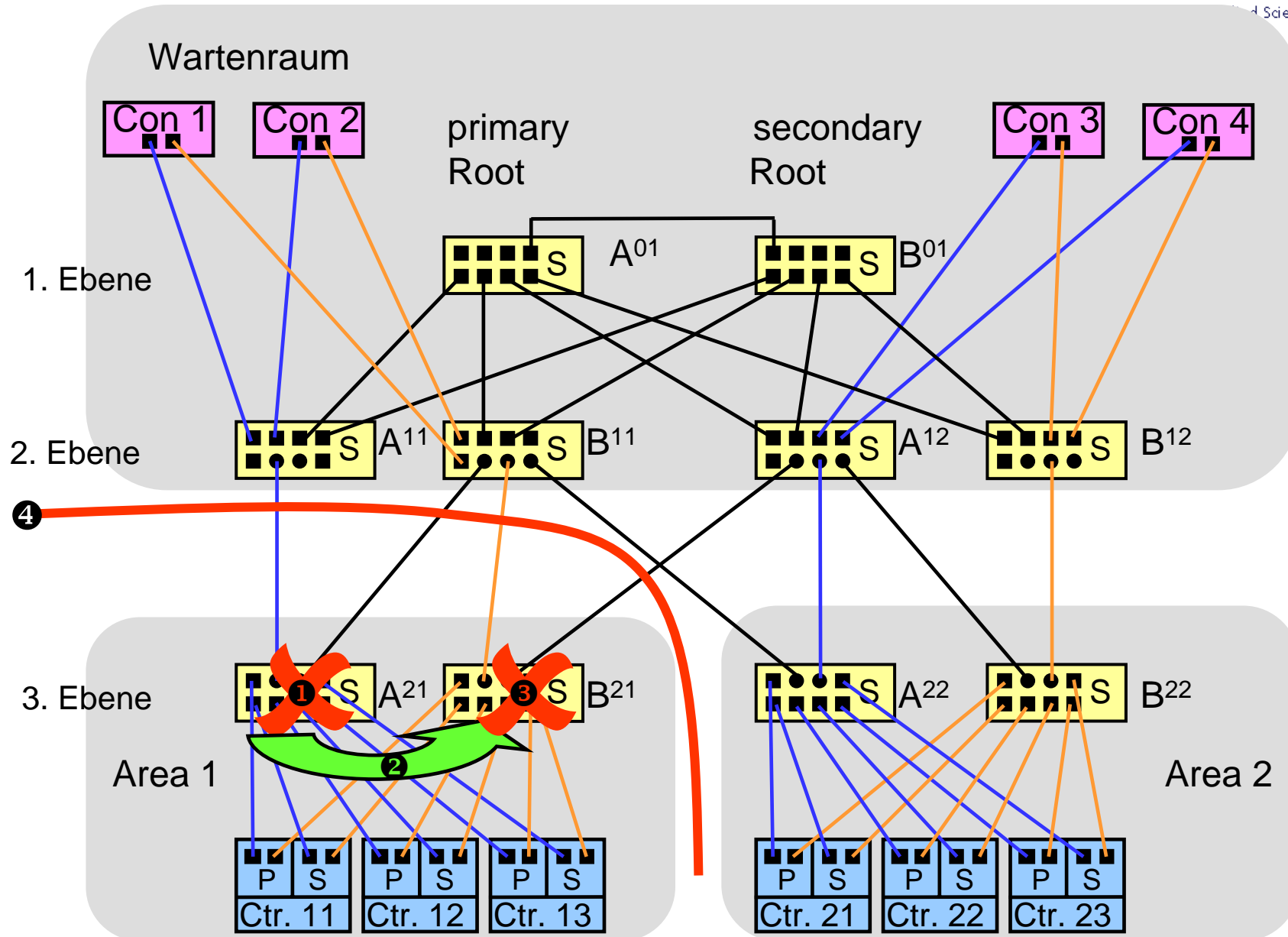
# Ausfallverhalten erweiterte Ringtopologie (2)



# Ausfallverhalten erweiterte Ringtopologie (3)



# Ausfallverhalten vermaschte Topologie



# Zusammenfassung Ausfallverhalten (1)

| Topologie             | Anzahl Fehler ohne Systemdegradation | Anzahl Fehler die zu einer Systemdegradation führen | Primäres und sekundäres Netzwerk getrennt |
|-----------------------|--------------------------------------|---|---|
| Stern                 | 1                                    | 2   | ja  |
| Baum                  | 1                                    | 2   | ja  |
| Linie                 | 1                                    | 2   | ja  |
| Ring                  | 1                                    | 2   | ja  |
| modifizierter Ring    | 3                                    | 4   | ja  |
| vermaschte Topologie* | 1                                    | 2   | nein                                      |

\*) Eine modifizierte vermaschte Topologie würde auch zu einer zulässigen Anzahl von Fehlern ohne Systemdegradation von 3 führen, dies jedoch bei höheren Verkabelungs- und Portkosten.

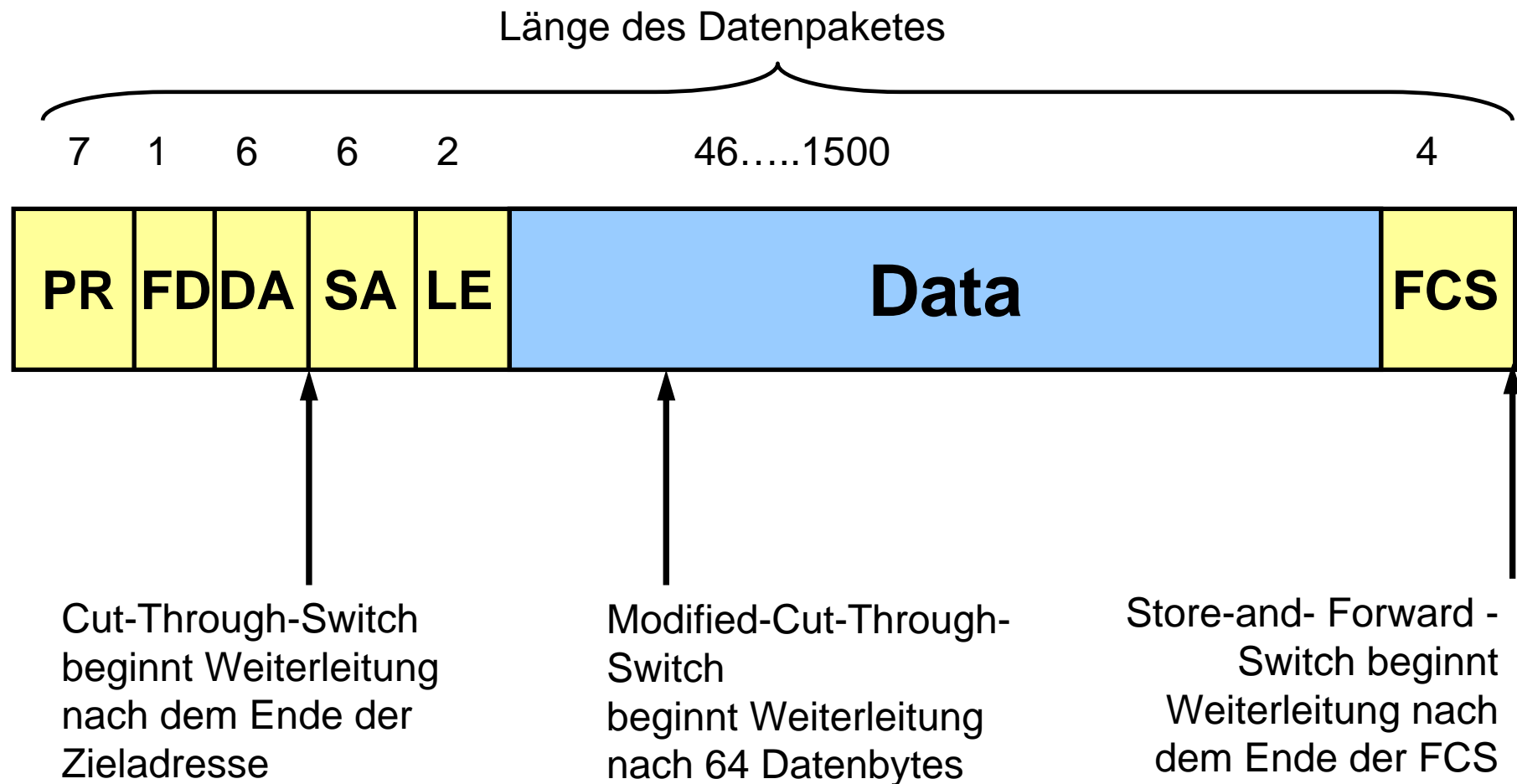
## Zusammenfassung Ausfallverhalten (2)

- ◆ Alle Topologien tolerieren, bedingt durch den redundanten Aufbau, einen Einfachfehler.
- ◆ Bei einem Doppelfehler ist der betroffene Anlagenteil nicht mehr erreichbar.
  - ◆ Die Auswirkungen auf den Rest der Anlage hängen von der Topologie ab.
  - ◆ Hier ist die Linientopologie besonders kritisch, der Ring eher günstig.
- ◆ Der Einsatz erweiterter Redundanzmechanismen toleriert, durch eine Kombination von CPU- und Netzwerkredundanz, auch doppelte Fehler. Hier gezeigt am Beispiel des erweiterten Rings.

# Inhalt

- ◆ Einleitung
- ◆ Verkabelungsstandards
- ◆ Topologiebetrachtungen
- ◆ Kostenanalyse
- ◆ Ausfallverhalten
- ◆ Verzögerungszeiten
- ◆ Zusammenfassung

# Abhängigkeit der Verzögerung vom Weiterleitungsverfahren (1)



## Abhängigkeit der Verzögerung vom Weiterleitungsverfahren (2)

- ◆ Die Durchlaufverzögerung durch einen Switch ist vom Weiterleitungsverfahren abhängig.
- ◆ Für die weitere Betrachtung wird hier das Store-and-Forward-Verfahren zu Grunde gelegt.
  - ◆ Hier wird das Nachrichtenpaket erst nach vollständigem Eingang und nach Prüfung der FCS weitergeleitet.
  - ◆ Bei dieser Betrachtung besteht die Latenzzeit im Wesentlichen aus der Zeit, welche die vollständige Übertragung des Nachrichtenpaketes benötigt, zuzüglich der Verarbeitungszeit im Switch.
  - ◆ Zur Vereinfachung der Berechnung wird im Folgenden die Betrachtung der Durchlaufverzögerung auf die Betrachtung der Anzahl Switches reduziert.

# Anzahl Switches zwischen Leitebene und Prozessebene bei Mustertopologie

| Topologie            | Maximale Anzahl Switches zwischen Konsole und Controller ungestörter Betrieb | Maximale Anzahl Switches zwischen Konsole und Controller bei Einfachfehler | Maximale Anzahl Switches bei Doppelfehler |
|----------------------|--|--|---|
| Stern                | 1  | 1  | Verbindung unterbrochen                   |
| Baum                 | 2  | 2  | Verbindung unterbrochen                   |
| Linie                | 5  | 5  | Verbindung unterbrochen                   |
| Ring                 | 3  | 3  | 4 (worst case)                            |
| Erweiterter Ring     | 5  | 5  | 6 (worst case)                            |
| vermaschte Topologie | 2  | 2  | Verbindung unterbrochen im worst case     |

# Zusammenfassung

- ◆ Baum, Linie, Ring und modifizierter Ring zeigen bei den betrachteten Anlagengrößen die günstigsten Kosten.
- ◆ Alle Topologien beherrschen Einfachfehler.
- ◆ Bei einem Doppelfehler bieten Ring- und vermaschte Topologie noch die Erreichbarkeit großer Anlagenteile.
- ◆ Die modifizierte Ringtopologie gestattet durch die Kombination von CPU- und Netzwerkredundanz die Beherrschung von Doppelfehlern.
- ◆ In Bezug auf die Durchlaufverzögerung bieten Stern und Baum ein besonders günstiges Verhalten.