

Christiane Thomas, Benedikt Bederna
Fakultät Maschinenwesen // Institut für Energietechnik
Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik

02 Sensorik, Aktorik und Transientes Verhalten

LV: Regelung von Kälteanlagen
Wintersemester 2024/25

0 Überblick über die Lehrveranstaltung

Ablauf

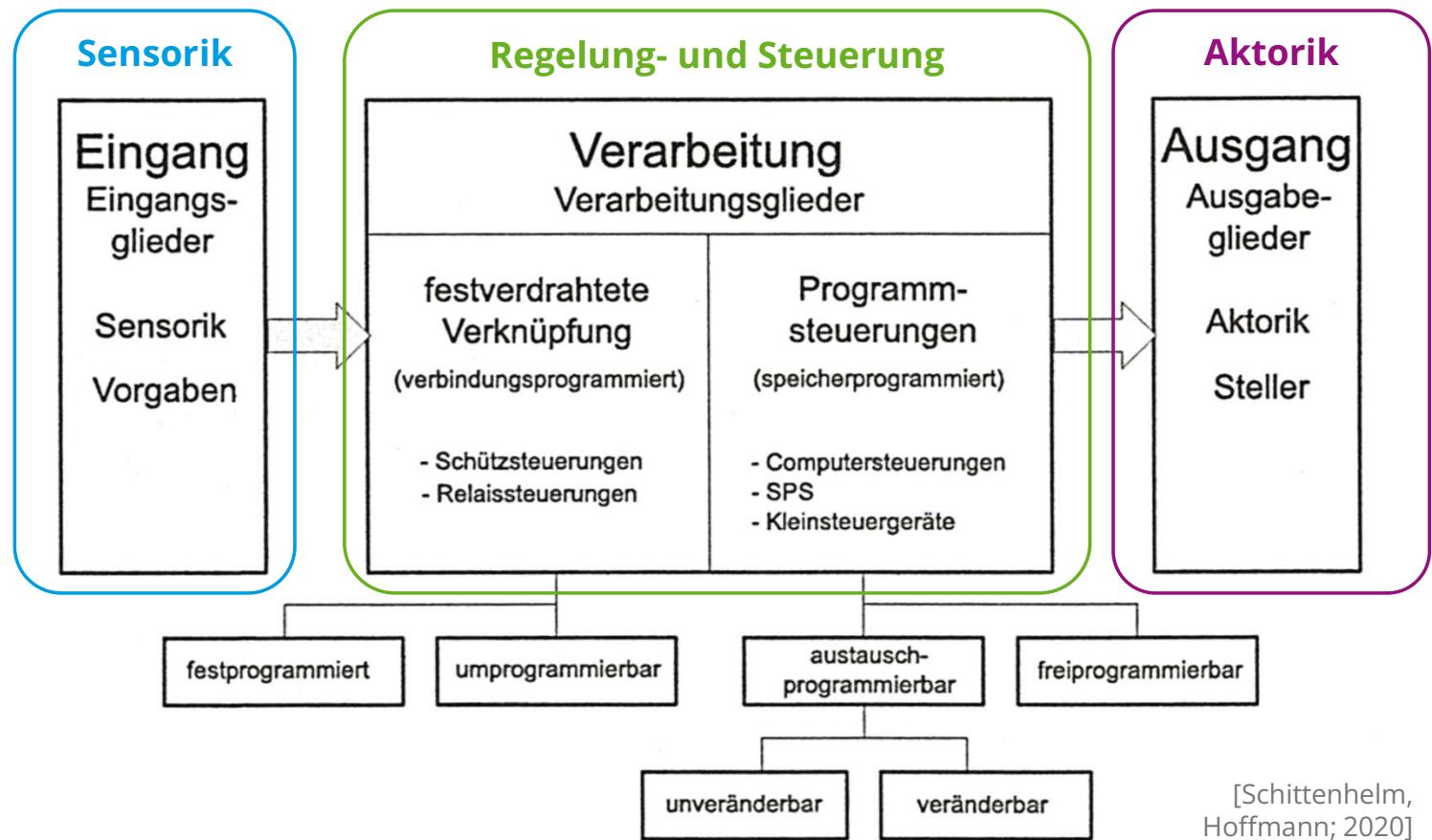
Regelung von Kälteanlagen		Vorlesung	Übung	
	Nr.	Thema	Nr	Inhalt
17.10.2024	1	Regelung auf System- und Komponentenebene, Messtechnik und Datenerfassung	1	Einführung Modelica
24.10.2024				
31.10.2024		Feiertag	2	Kennenlernen TIL
07.11.2024				
14.11.2024	2	Transientes Verhalten, Anfahrverhalten von Kälteanlagen, Regelung zum Anfahren		
21.11.2024		DKV	3	Blick in die Komponente - WÜ
28.11.2024			4	Kreislaufmodellierung
05.12.2024	3	Antriebstechnik für Ventilator und Verdichter	5	Blick in die Komponente - Verdichter
12.12.2024				
19.12.2024		Vorlesungsfreie Zeit (Weihnachten)		
09.01.2025	4	Anfahrprozesse	6	Transientes Verhalten I
16.01.2025			7	Transientes Verhalten II
23.01.2025				
30.01.2025	5	Multisplit-Systeme	8	PID
06.02.2025				

0 Einordnung Sensorik und Aktorik

0 Überblick über die Lehrveranstaltung

Einordnung Sensorik und Aktorik

1. Messtechnik/
Sensorik
2. Elektrische Aktorik
3. Steuerungs- und
Regelungstechnik
4. Kommunikation
5. Datenerfassung



0 Überblick über die Lehrveranstaltung

Beispiel zu Sensorik und Aktorik

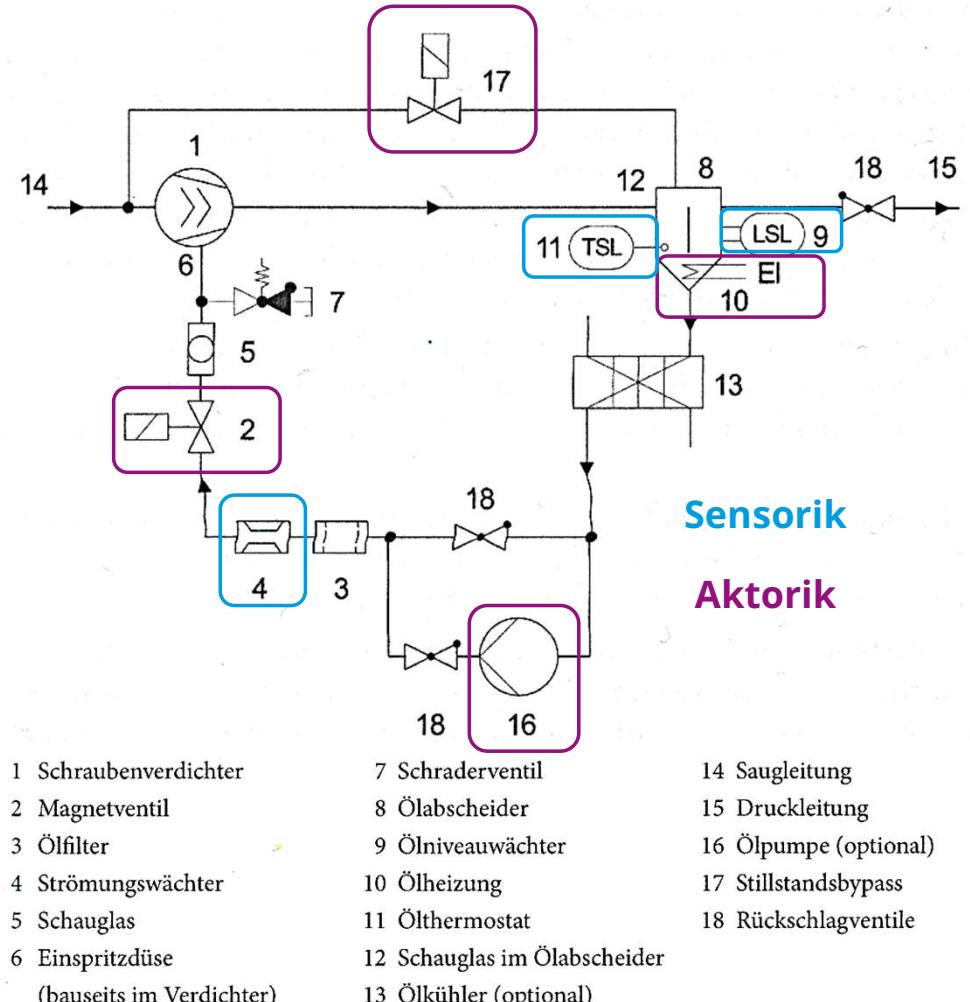
Überwachung und Steuerung des Schmierölkreislaufs im Schraubenverdichter

Sensorik

- Umwandlung von nicht-elektrischen Messgrößen in Signale

Aktorik

- Umwandlung von Signalen in Bewegung zwecks Kreislaufbeeinflussung

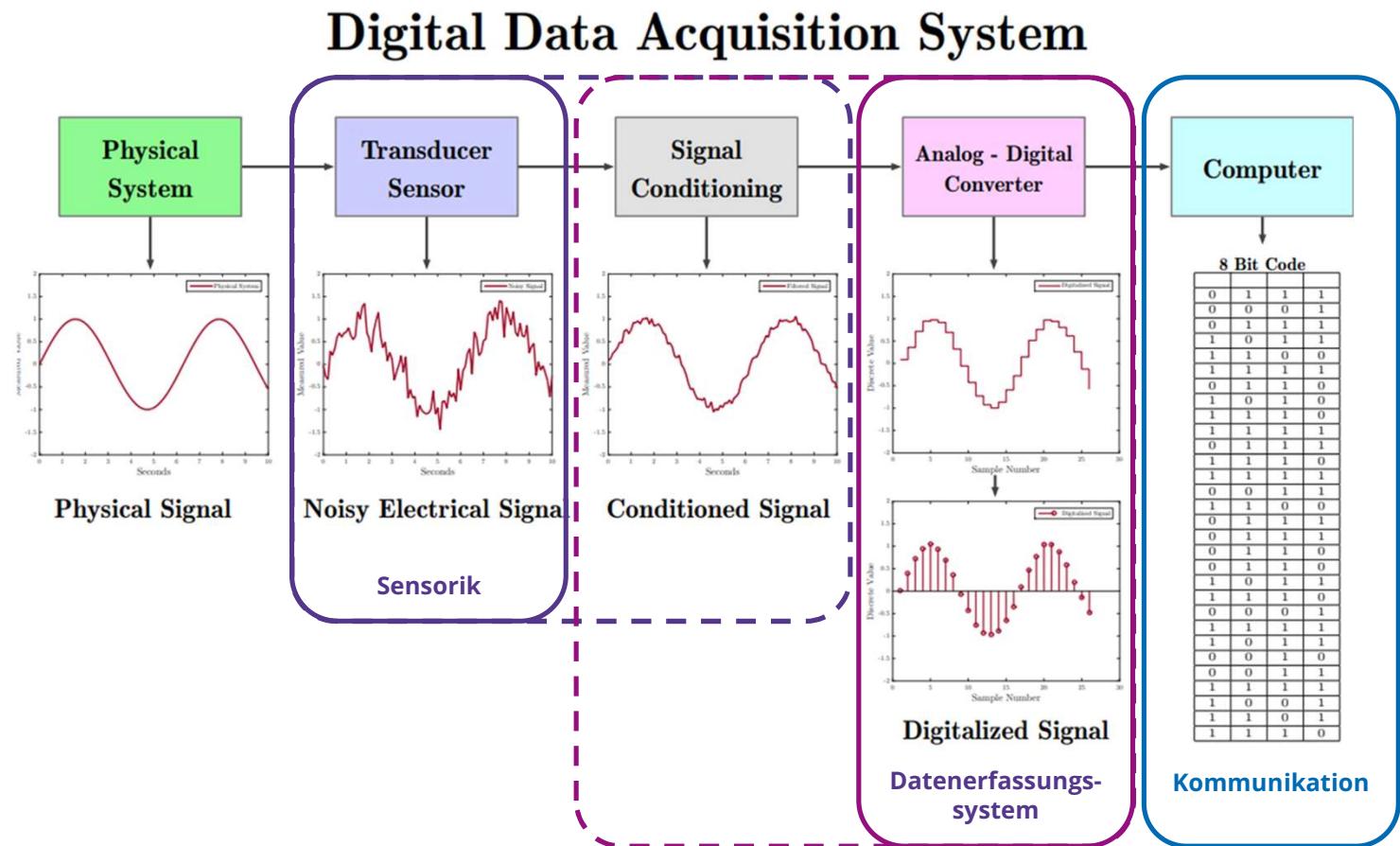


[Schittenhelm, Hoffmann; 2020]

0 Überblick über die Lehrveranstaltung

Einordnung der Datenerfassung

1. Messtechnik/
Sensorik
2. Elektrische Aktorik
3. Steuerungs- und
Regelungstechnik
4. Kommunikation
5. Datenerfassung



1 Messtechnik (Sensorik) in der Kältetechnik

1 Messtechnik in der Kältetechnik

Druckmessung – Überblick

Beispiel: Temperatur oder Druck innerhalb des Nassdampfgebiets messen?

Manometer

- Federbelastet
- Spez. Anzeige für Verdampfungstemperatur der Kältemittel inklusive



Manometer
[Schiessl]

Elektrische Messprinzipien

- Piezoelektrische Sensoren (Spannung bei Verformung von Festkörpern)
- Dehnungsmessung
- Kolbenmanometer



Eigenschaft

- Teurer als Temperaturmessung

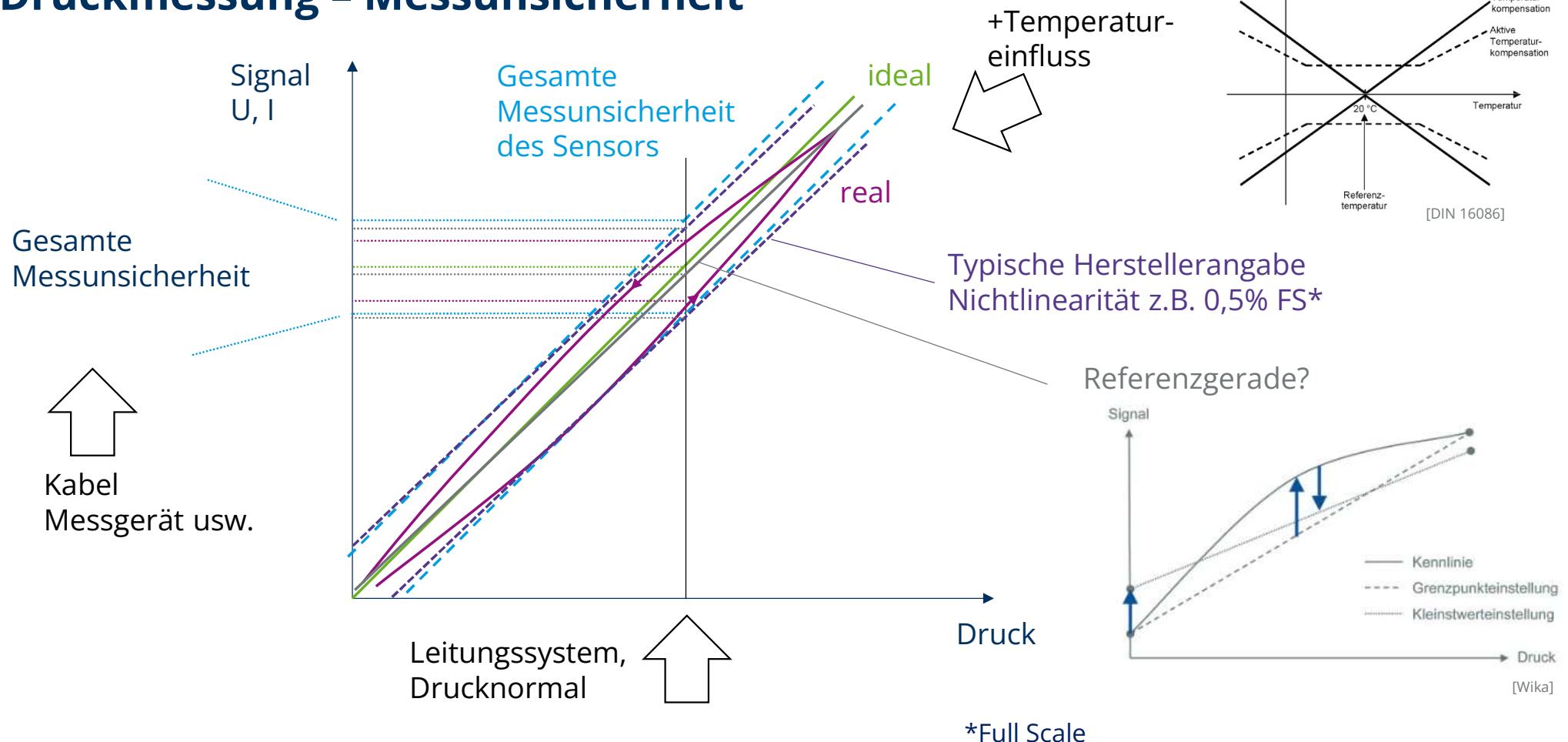
Anwendung in der Kältetechnik

- Druckschalter → Schutz des Verdichters
- Verdampfungsdruck
→ Frostschutz, Pump-Out)
- Effiziente Regelung (p_c, p_0)

Druckumformer
[Danfoss]

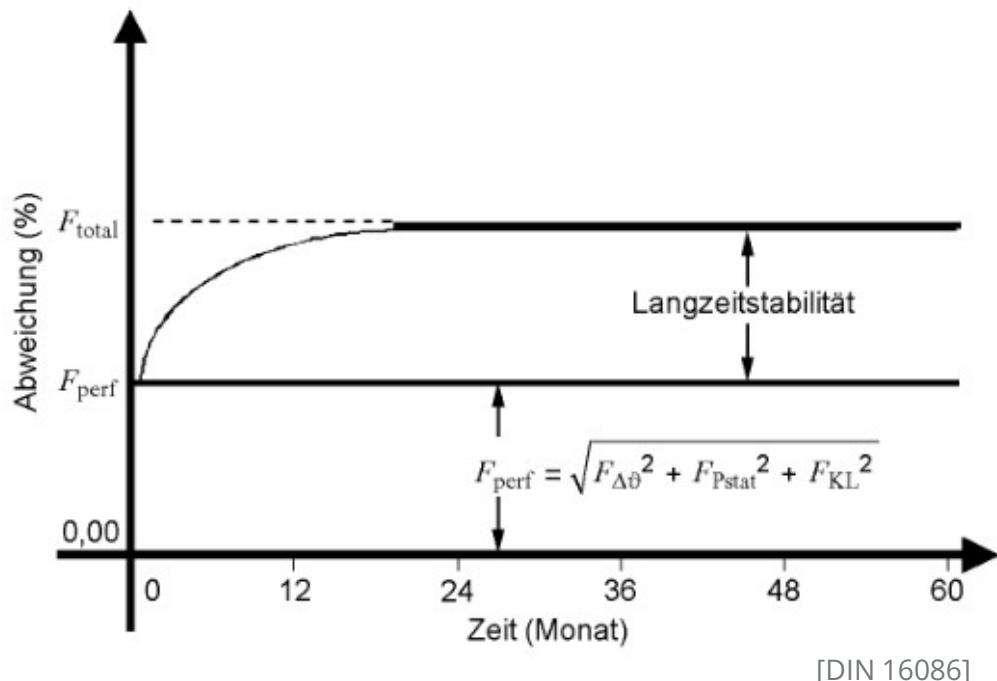
1 Messtechnik in der Kältetechnik

Druckmessung – Messunsicherheit



1 Messtechnik in der Kältetechnik

Druckmessung – Langzeitstabilität



→ Kalibrieren

→ Empfehlung für elektrische Druckmessgeräte :

> 0,5 % v. S. 2 Jahre

<= 0,5 % v. S. 1 Jahr

1 Messtechnik in der Kältetechnik

Temperaturmessung – Überblick

Grundmessprinzipen

- Widerstandsmessung
- Thermoelemente
- Thermistoren



Konfiguration

- Anlegefühler
- Einschraubfühler
(zum Eintauchen)



Anwendung

- Überhitzung
- Kühlgutüberwachung
- Luftüberwachung
- Messung Sekundärströme

Widerstandsmessung

- 2-/3-/4-Leiterschaltung
- I.d.R. Pt-1000 Widerstände
(Auflösung des relevanten Temperaturbereiches)
- Hohe **Messgenauigkeit**
- **Langlebig**

Thermistoren

- Temperaturabhängige Widerstände
- Heißleiter (NTC), Kaltleiter (PTC)
- Sehr **günstig**
- Geringe **Ansprechzeit**
- Kühlgutüberwachung
- Sekundärstromtemperaturmessung

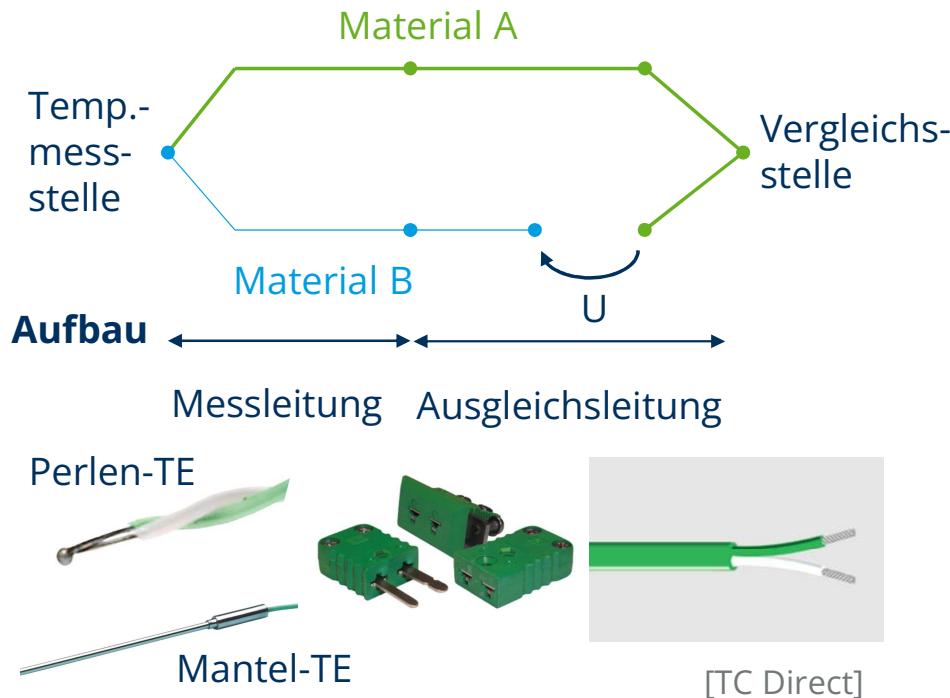
Thermoelemente (nächste Folie)

1 Messtechnik in der Kältetechnik

Temperaturmessung – Thermoelemente

Messprinzip

- Seebeck-Effekt



Materialpaarungen

IEC-Kodierung	Legierungskombination		IEC 584-3	Max. Temperaturbereich (TE-Leitung, Verlängerung)	Standardfehler-toleranz > 0°C	Sonderfehler-toleranz > 0°C
	Leitung (+)	Leitung (-)				
J	EISEN FE	KONSTANTAN Cu-Ni		0 bis 750°C 0°C bis 200 °C	2,2°C oder 0,75%	1,1°C oder 0,4%
K	CHROMEGA® Ni-Cr	ALOMEGA® Ni-Al		-200 bis 1250°C 0 bis 200 °C	2,2°C oder 0,75%	1,1°C oder 0,4%
T	KUPFER Cu	KONSTANTAN Cu-Ni		-250 bis 350°C -60 bis 100°C	1,0°C oder 0,75%	0,5°C oder 0,4%
E	CHROMEGA® Ni-Cr	KONSTANTAN Cu-Ni		-200 bis 900°C 0 bis 200°C	1,7°C oder 0,5%	1,0°C oder 0,4%
N	OMEGA-P® Ni-Cr-Si	OMEGA-N® Ni-Si-Mg		-270 bis 1300°C 0 bis 200°C	2,2°C oder 0,75%	1,1°C oder 0,4%
R	Pt-13% Rh	PLATIN Pt		0 bis 1450°C 0 bis 150°C	1,5°C oder 0,25%	0,6°C oder 0,1%
S	Pt-10% Rh	PLATIN Pt		0 bis 1400°C 0 bis 150°C	1,5°C oder 0,25%	0,6°C oder 0,1%
U	KUPFER-LOW CU	KUPFER-LOW Cu-Ni		0 bis 50°C		

[Omega]

Eigenschaften

- Elektronische Auswertung (Kaltstellenkompensation)
- Stärken bei hohen Temperaturen, Temp.-Bereichen

1 Messtechnik in der Kältetechnik

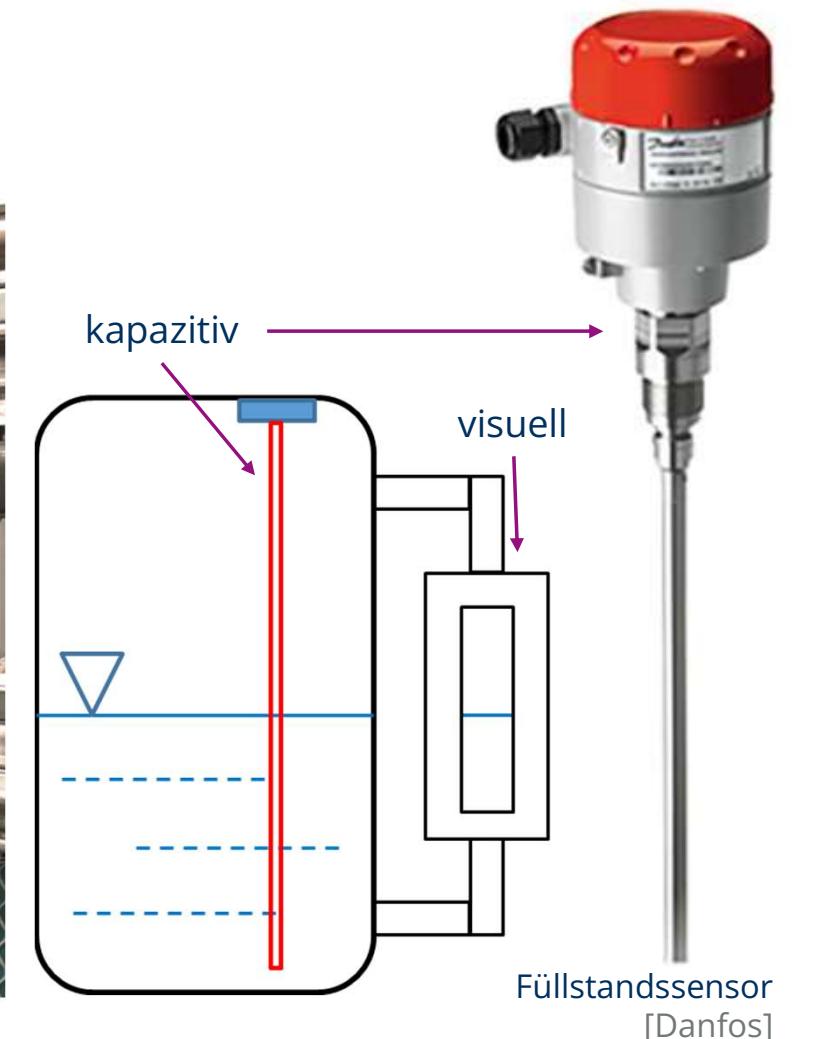
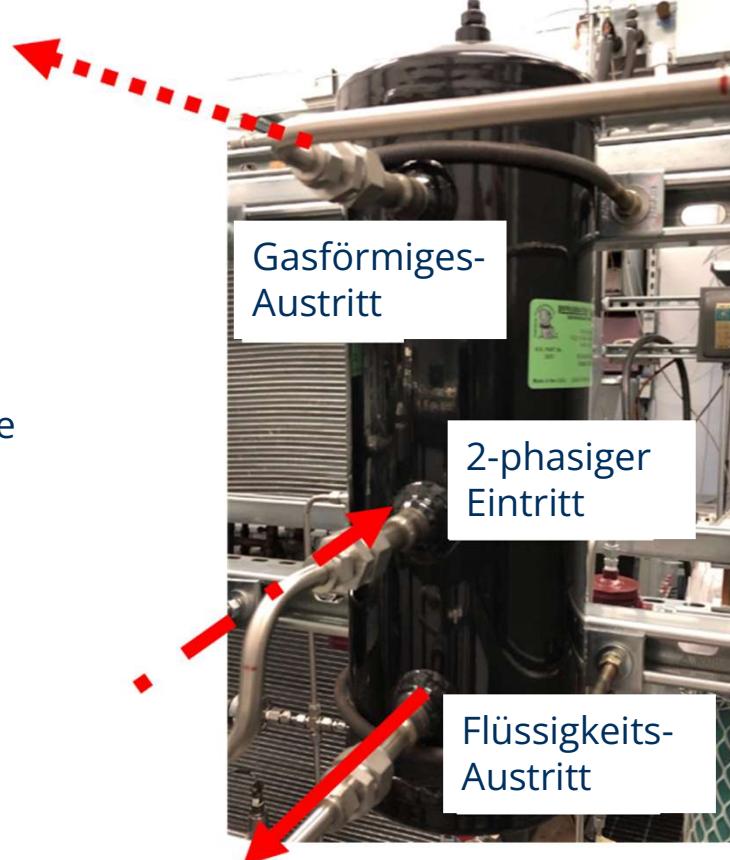
Füllstandsmessung

Verbreitete Messprinzipen

- kapazitiv
- Visuell
- Ultraschall

Anwendung

- Ölstandsmessung
- Kältemittelfüllmenge



1 Messtechnik in der Kältetechnik

Durchflussmessung – Übersicht in KT verwendeter Verfahren

Darstellung nicht vollständig

Messverfahren	Flügelrad/Turbine	Ultraschall	Magnetisch-Induktiv	Coriolis	Schwebekörper	Heizdraht
Messgröße			Strömungsgeschwindigkeit		Geschwindigkeit	Widerstand
Ergebnisgröße			Volumenstrom	Massenstrom, Dichte	Volumenstrom	Massenstrom
Messprinzip	Strömung treibt Turbine	Schallgeschwindigkeit in Strömung	Ladungstrennung im Magnetfeld	Massestrom bringt Rohrbogen ins Schwingen	Auftrieb durch Strömung	Strömung kühlte erhitzten Widerstand
Vorteile	Sehr geringe Kosten	- Keine Beeinflussung - Gr. Messbereich - Externe Messung	- Keine Beeinflussung - Gr. Messbereich	- Genauigkeit - 2 Messgrößen	Kosten	
Nachteil		- Fluidkalibrierung - Begrenzte Verschmutzung	Mindestleitfähigkeit nötig		Starke Beeinflussung	
Anwendung	Strömungswächter	Flüssige Sekundärströme (Kältezähler) auch Eingriffsfrei, Kältemittelströmung		Kältemittelströmung		Luftströmung

2 Aktorik in der Kältetechnik

2 Aktorik

Konfiguration

Direktwirkend

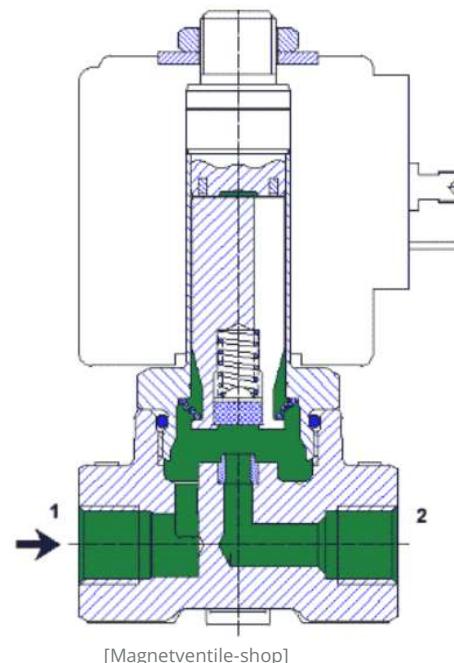
- Antrieb vollbringt Hub und Anpressung
- Größere **el. Leistungsbedarf**
- Begrenzte
Druckdifferenzen

Antrieb

- Elektrisch
- Pneumatisch

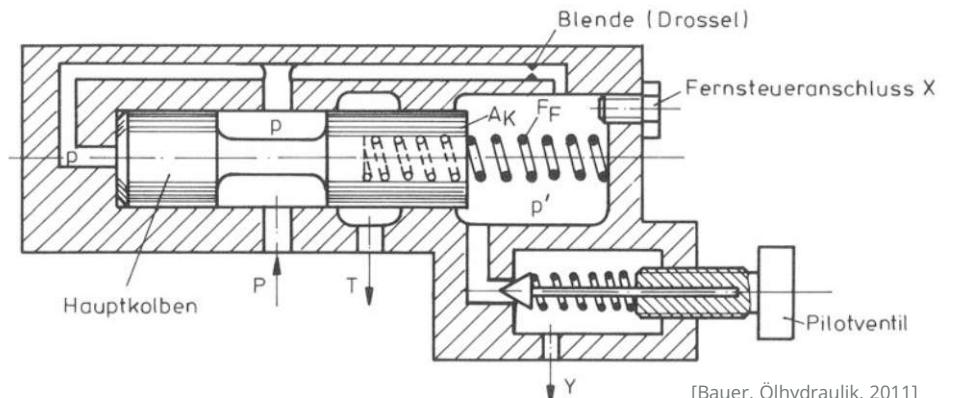
Anwendung

- „Magnetventile“ im Kältemittelkreislauf



Pilot- und Hauptventil

- Kleines Vorventil schaltet Hochdruckleitung
- Hochdruck erbringt Hub/Anpressung



Anwendung

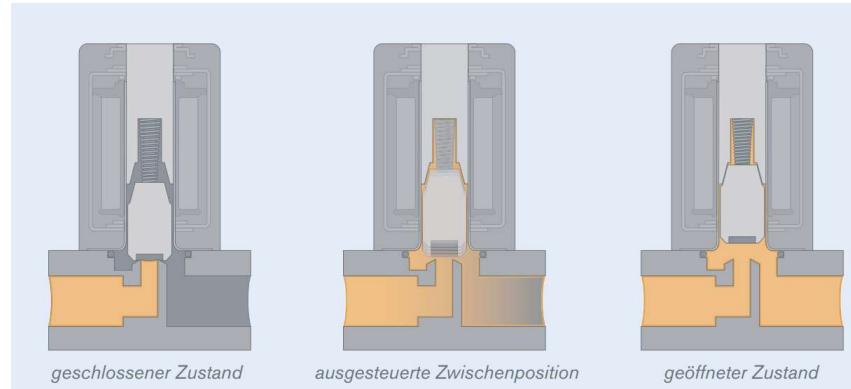
- Große Hübe
- Große Druckdifferenzen
- Vier-Wege-Umschaltventil

2 Aktorik

Elektrische direktwirkende Ventile

Elektromagnetisch

- Linearmotor
- Leistungsgrenzen
- i.d.R. federbelastet



[Bürkert]

Anwendung

- Absperrventile
- Kleine Proportionalventile

Elektromotorisch

- Schrittmotor
- Spindel

Vorteile

- verzögerungsfrei (gegenüber pneumatischen)
- Kein Überschwingen bzgl. Endposition
- Sanftes Anfahren der Endposition
- Halten der Position auch bei Druckschwankung

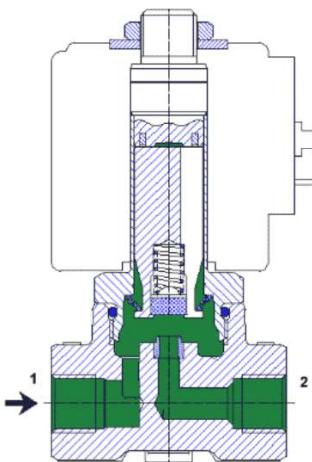
Anwendung

- Regelventile mit hoher Anforderung an Regelgüte
- EXV
- Große Ventile

2 Aktorik Ventilarten

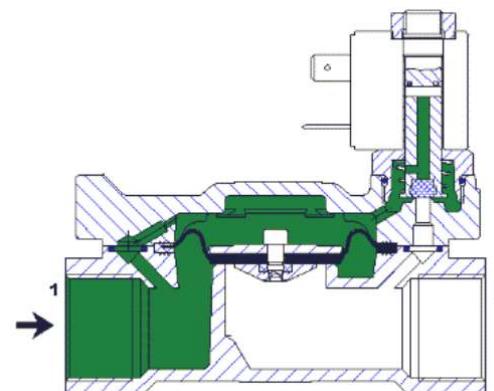
Direktgesteuert

- Elektrische Antrieb erbringt Hub des Dichtelements
- Rückstellfeder
- Selbstschließend oder selbstöffnend
- Große Elektroantriebe



Vorgesteuert (servogesteuert)

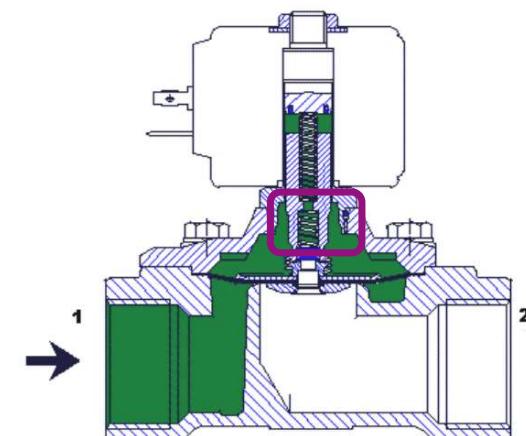
- Klein, leicht, günstig
- Hohe Druckdifferenz
- **Mindestdruckdifferenz** zum schließen notwendig



Selbstschließende Ausführungen

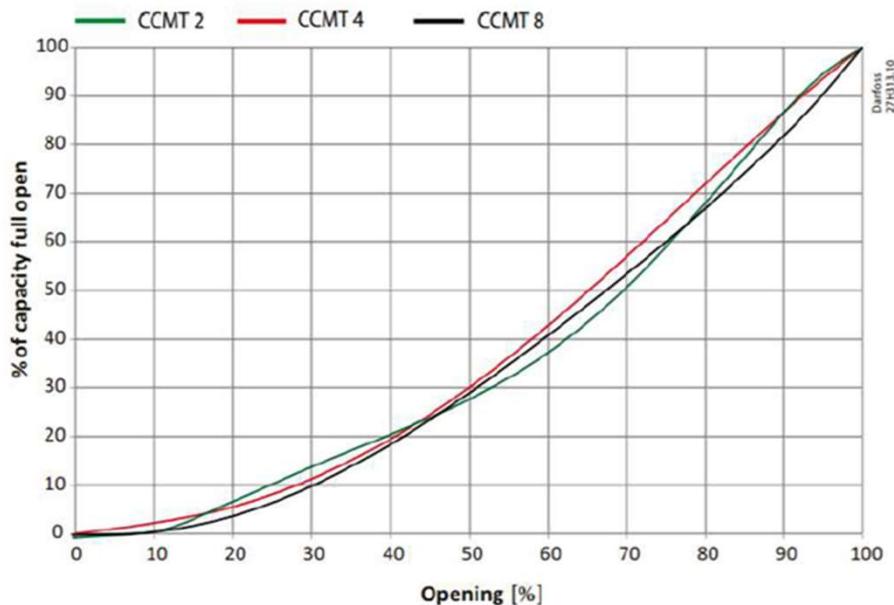
Zwangsgesteuert

- El-Antrieb unterstützt Öffnung
- Öffnet zunächst Vorsteuerbohrung
- Keine Mindestdruckdifferenz



2 Aktorik

Elektrisches Expansionsventil



- Kälteleistung in Abhängigkeit vom Ventilöffnungsgrad
- Controller nötig



2 Aktorik Elektrische Heizungen

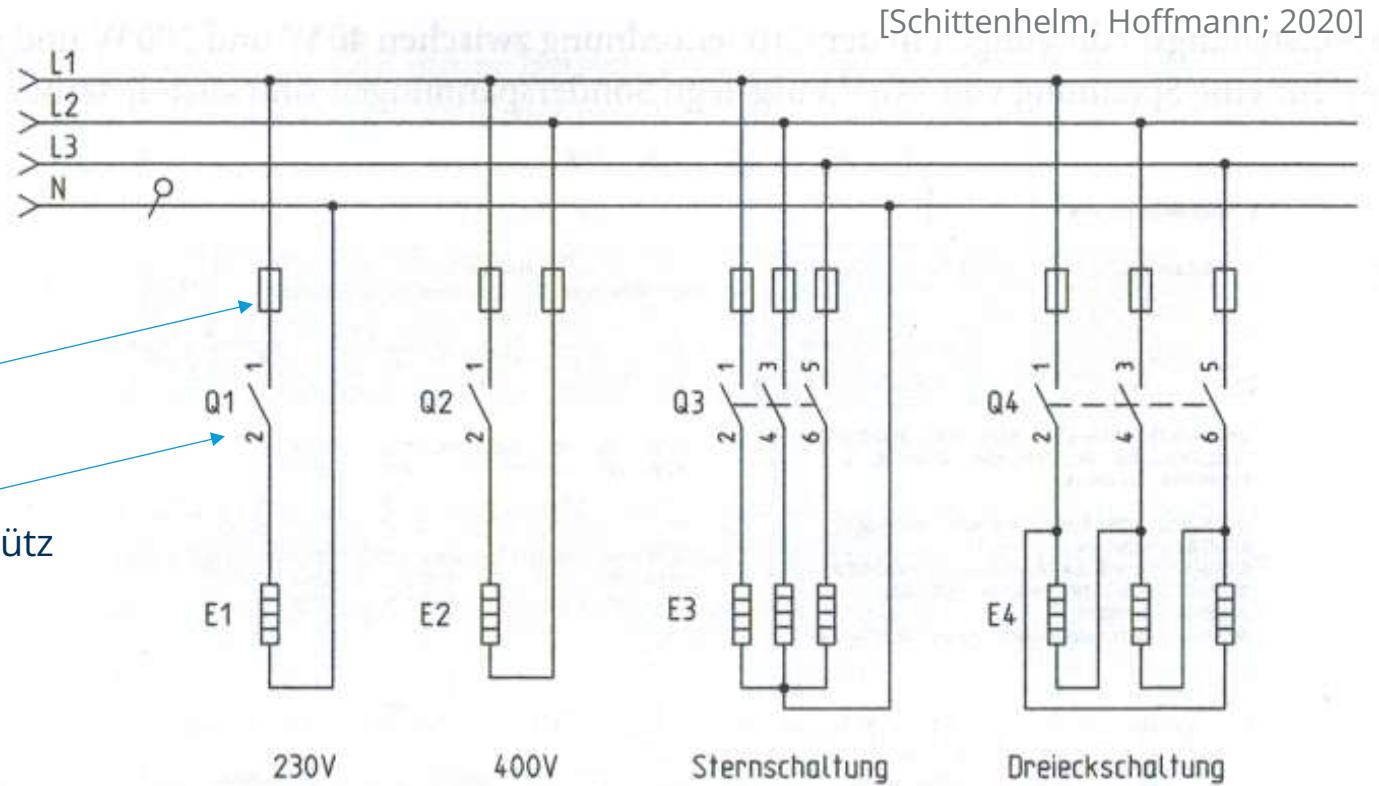
Anwendungen

- Verdampferabtauung
- Ölumpfheizung

Schaltungsvarianz

- Unterschiedliche Leistungsklassen

El. Heizer
„Schalter“ → i.d.R. Schütz



2 Aktorik **Schütze**

Schütz

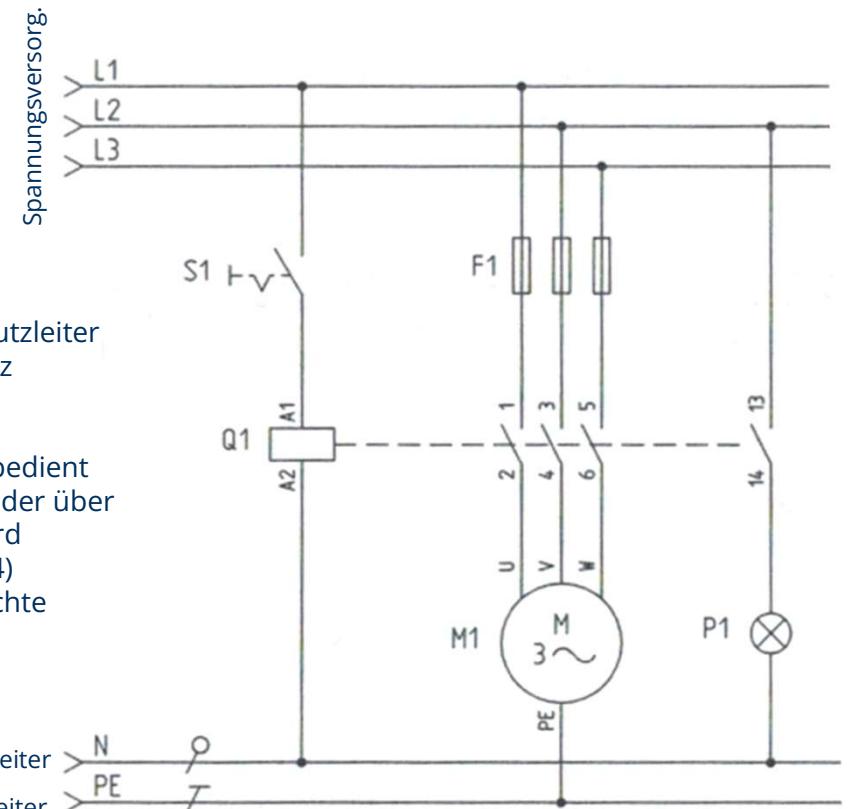
- Elektromechanischer Schalter mit Steuerleistung mit großer Schaltleistung
- Steuerstrom schaltet Schaltströme
- Hilfskontakte können vorhanden sein
- An → An (ansonsten öffnet Feder die Schaltbrücken, „normally closed“)



[Wikipedia: Schütz]

Bsp.:

- Verdichtermotor mit Schutzleiter (PE) für Berührungsschutz
- Motor abgesichert über 1 Sicherung je Phase (F1)
- 3-ph. Schalter (1-6) wird bedient durch el. Magneten (Q1), der über Taster S1 angesteuert wird
- Zusätzlich Schalter (13/14) geschlossen → Signalleuchte

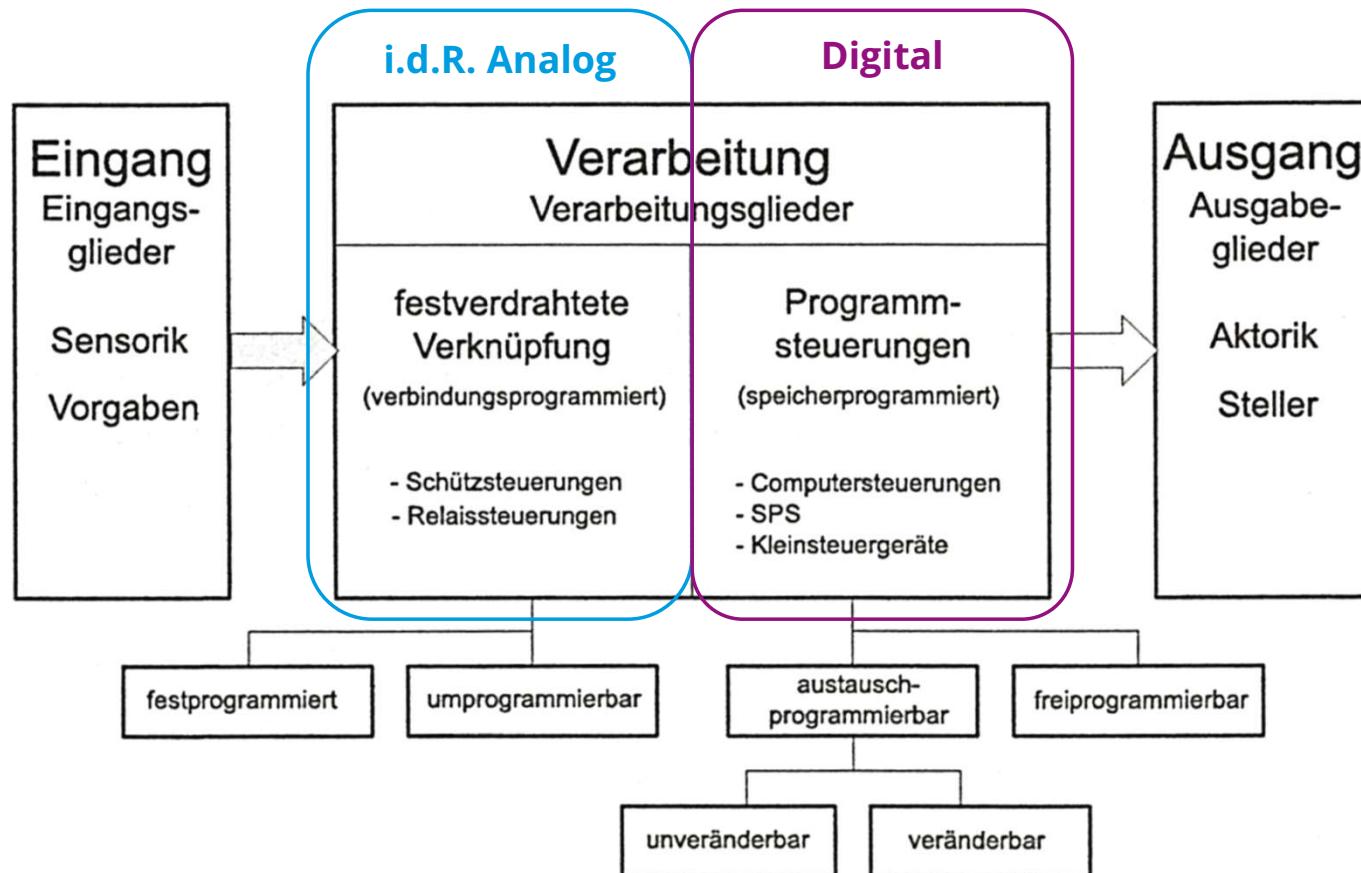


[Schittenhelm, Hoffmann; 2020]

3 Regelungs- und Steuerungstechnik

3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Analoge und digitale Technik

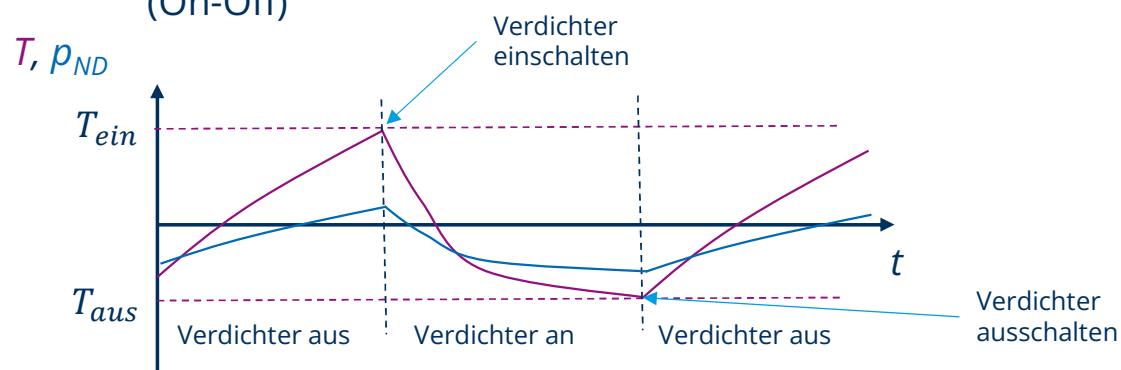


3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Beispielhafte Regelherausforderung

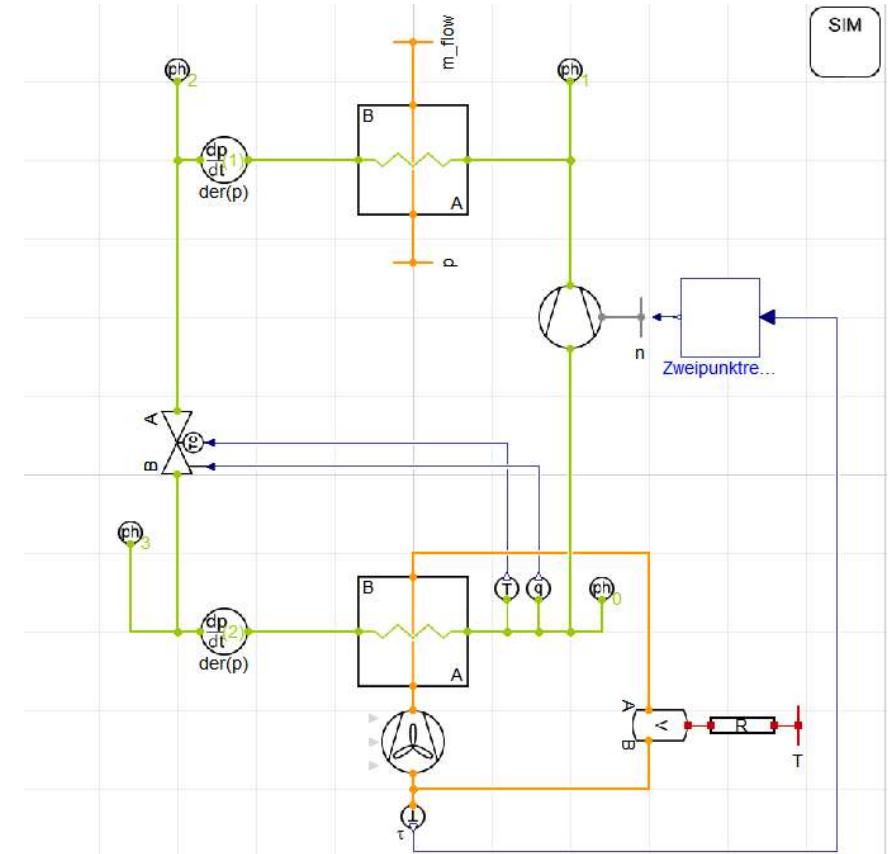
Kühl Lager mit einfacher Konfiguration

- TXV
 - Verdichterregelung via Zwei-Punkt-Regler (On-Off)



Herausforderungen

- Stillstandsfall: TXV ist nicht dicht
→ Leckagestrom → Kältemittelsammlung im Verdampfer → Gefahr eines Flüssigkeitsschlags
 - Gefahr von Ölschäumung
→ Lösung: „Pump down“



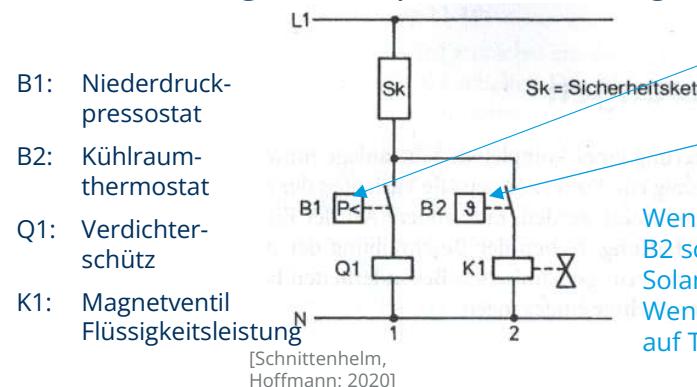
3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Analoge Stillstandsregelung

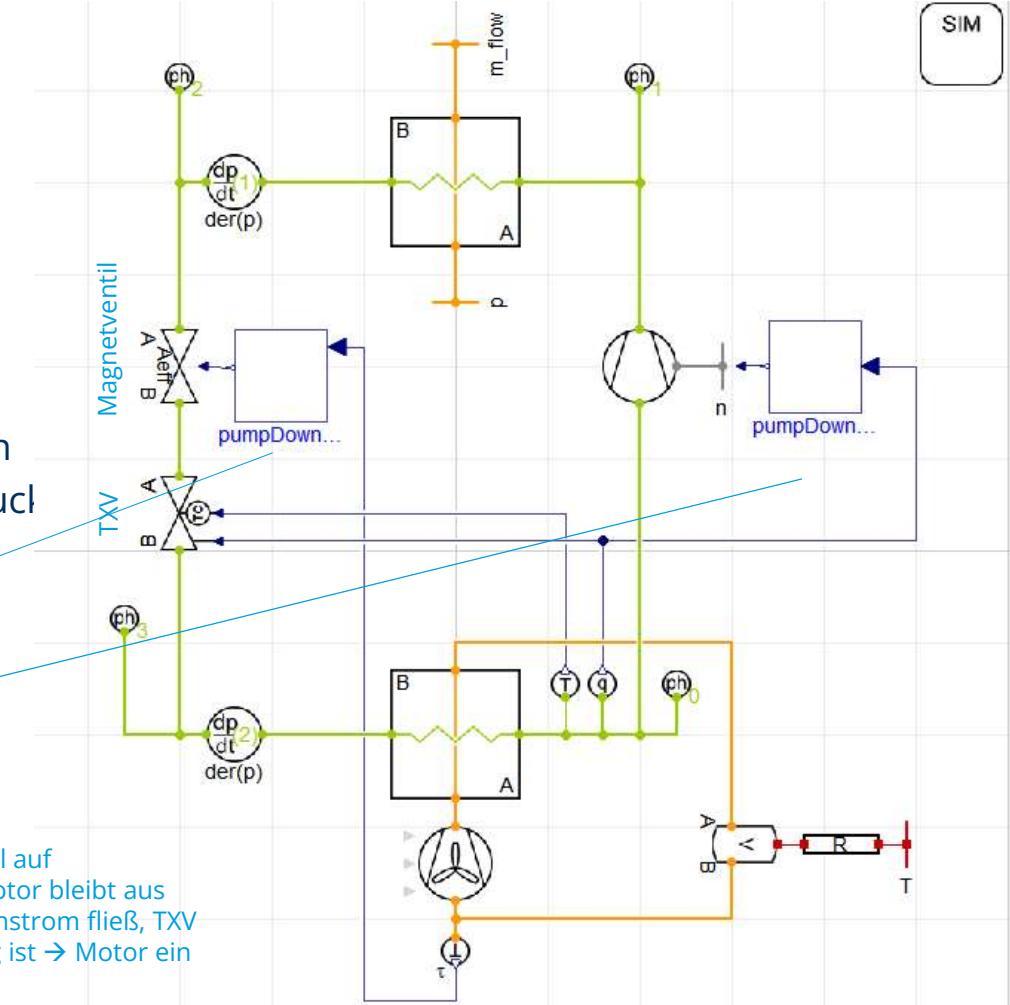
SIM

Pump-down-Schaltung

- Verdichterschutz von Flüssigkeit beim Anfahren
- Kältemittelabsaugung und Bevorratung auf HD-Seite
- Steuerung nach Raumtemperatur und Verdampfungsdruck
- Immer Absaugung wenn Verdampfungsdruck zu hoch
- Herausforderungen bei Abtauung → el. Heizen → Druck steigt → Verdichter an → Verdichter arbeitet gegen Abtauung → Pump out Schaltung



Wenn $T_{\text{Kühlraum}}$ überschritten →
B2 schaltet Zusatz-Magnetventil auf
Solang p_{ND} unter Sollwert → Motor bleibt aus
Wenn Magnetventil auf, Massenstrom fließt, TXV
auf T_1 regelt und p_0 groß genug ist → Motor ein

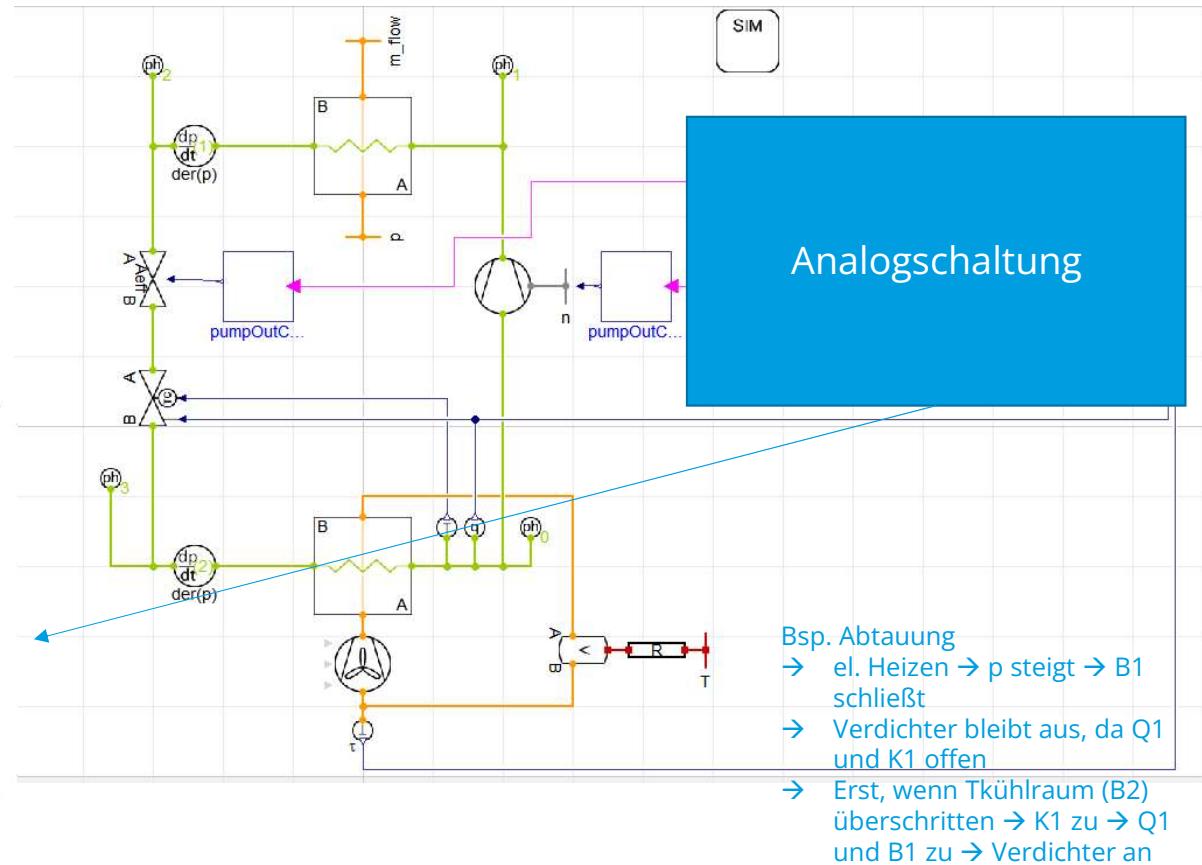
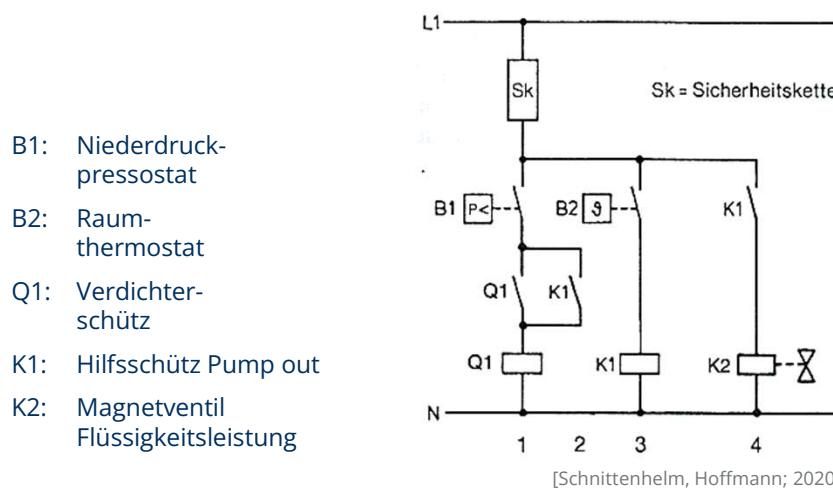


3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Analoge Stillstandsregelung

Pump-out-Schaltung

- Einmalige Kältemittelabsaugung und Bevorratung auf Hochdruckseite
- Verdichterbetrieb nur bei Raumtemperaturüberschreitung und nicht an Druck gekoppelt
- Z.B. Keine Absaugung bei Abtauung

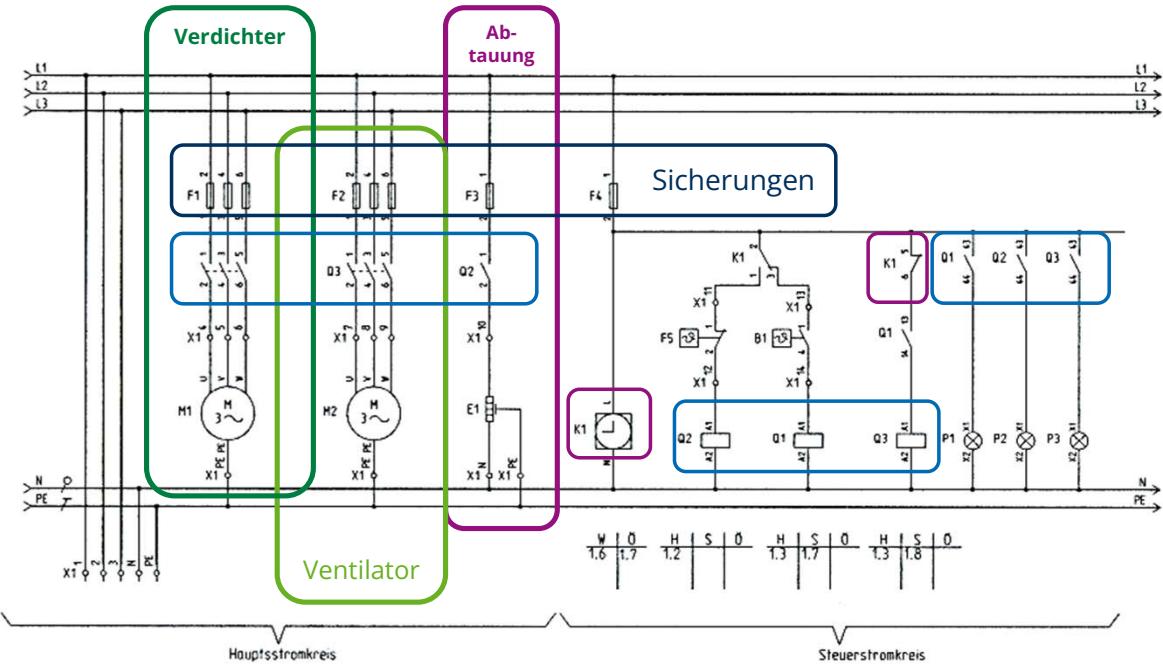


3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Analoge Steuerungs- und Regelungstechnik

Schaltung Gesamtanlage

- Steuerung erfolgt über Schütze
- Konventionelle Schaltung ohne:
 - Heißgasabtauung
 - Drehzahlregelung
 - Abtauungsbedarfserkennung
 - Motorschutzeinrichtung



M1: Verdichtermotor

M2: Verdampferventilator

E1: Abtauheizung

F1: Sicherung Verdichter

F2: Sicherung Verdampferventilator

F3: Sicherung Abtauheizung

F4: Sicherung Steuerstromkreis

F5: Abtaubegrenzungsthermostat

K1: Abtauuhrr

Q1: Verdichterschütz

Q2: Heizungsschütz

Q3: Verdampferventilatorschütz

B1: Raumthermostat

P1: Meldeleuchte Kühlbetrieb

P2: Meldeleuchte Abtauung

P3: Meldeleuchte Verdampferlüfter EIN

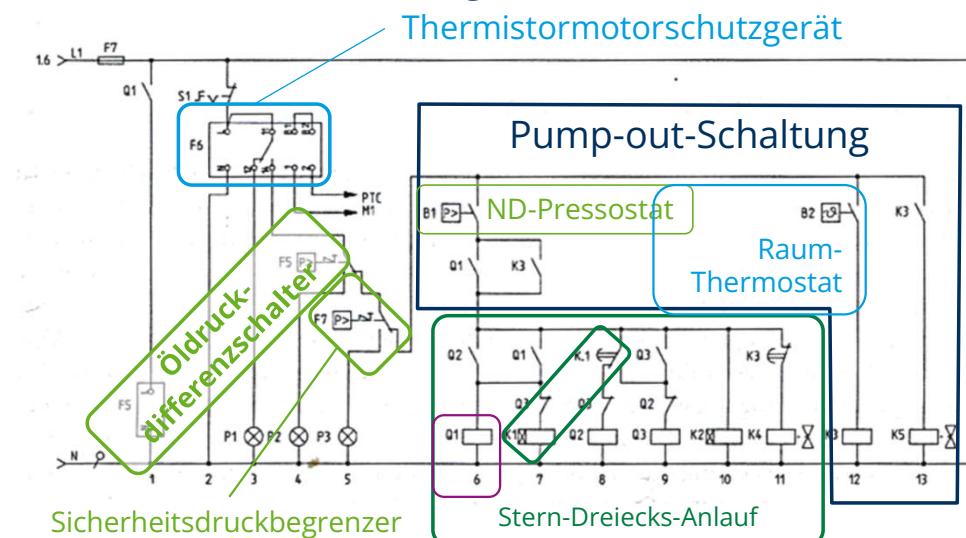
[Schittenhelm, Hoffmann; 2020]

Analoge Steuerungs- und Regelungstechnik

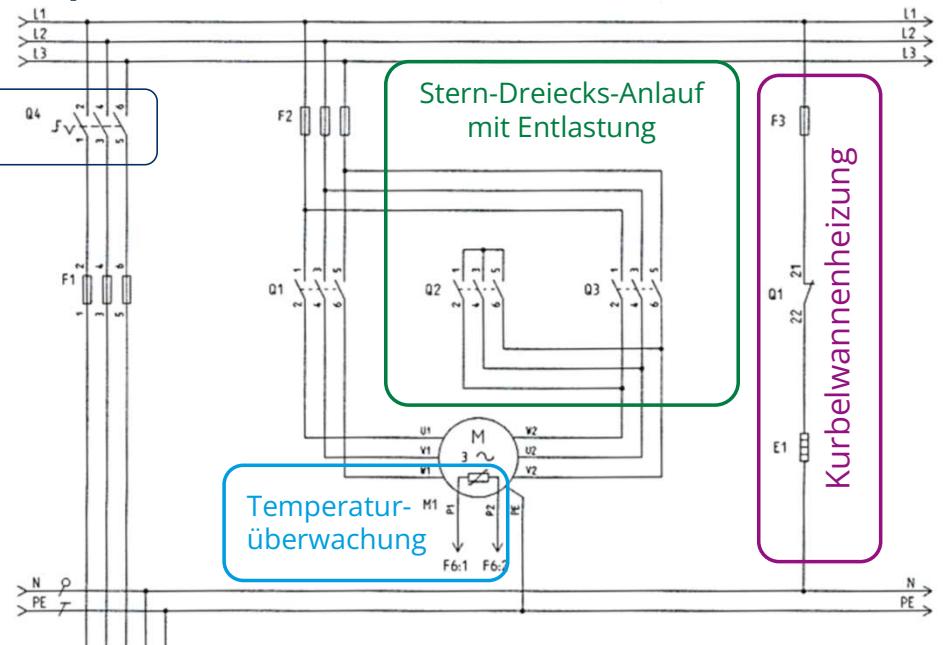
Komplexität von Steuerungsschaltungen

Funktionalität

- Stern-Dreiecks-Anlauf mit Entlastung für Verdichtermotor
- Motorschutz (Temperatur, Öl, Druck)
- Pump-out-Schaltung
- Kurbelwannenheizung (Vor Anlauf)



Hauptstromkreis



➤ Entwurfs- und Installationsaufwand von Analogtechnik bei großer Funktionalität fraglich

[Schittenhelm, Hoffmann; 2020]

3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Überblick über digitale Steuerungs- und Regelungstechnik

Kleinsteuergeräte

- Microcontroller, FPGA, ASIC etc.

SPS – Speicherprogrammierbare Steuerung

- Industriestandard

Computersteuerung

- Eingebundener PC



3 Steuerungs- und Regelungstechnik

Varianten digitaler Steuerungs- und Regelungstechnik

Implementation	Design Cost	Unit Cost	Upgrades & Bug Fixes	Size	Weight	Power	System Speed
Discrete Logic (Analog)	low	mid	hard	large	high	?	very fast
ASIC (Anwendungsspezifische integrierte Schaltung)	high (\$500K/mask set)	very low	hard	tiny - 1 die	very low	low	extremely fast
Programmable logic – FPGA, PLD	low	mid	easy	small	low	medium to high	very fast
Microprocessor + memory + peripherals	low to mid	mid	easy	small to med.	low to moderate	medium	moderate
Microcontroller (int. memory & peripherals)	low	mid to low	easy	small	low	medium	slow to moderate
Embedded PC	low	high	easy	medium	moderate to high	medium to high	fast

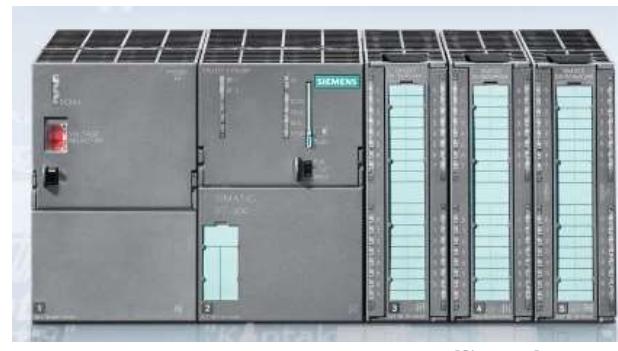
[ARM University Programm 2013]

Digitale Steuerungs- und Regelungstechnik

Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)

Eigenschaften

- Industriestandard
- Modular erweiterbar
- Anpassungsfähig
- Platzsparend
- Wartungsarm
- Zeitsparende Projektierung
- Kommunikationsfähig
- Fernzugriff möglich
- Automatische Projektdokumentation
- Hemmnis:
Technische Komplexität
Kosten bei kleinen Anlagen



[Siemens]



[WAGO]

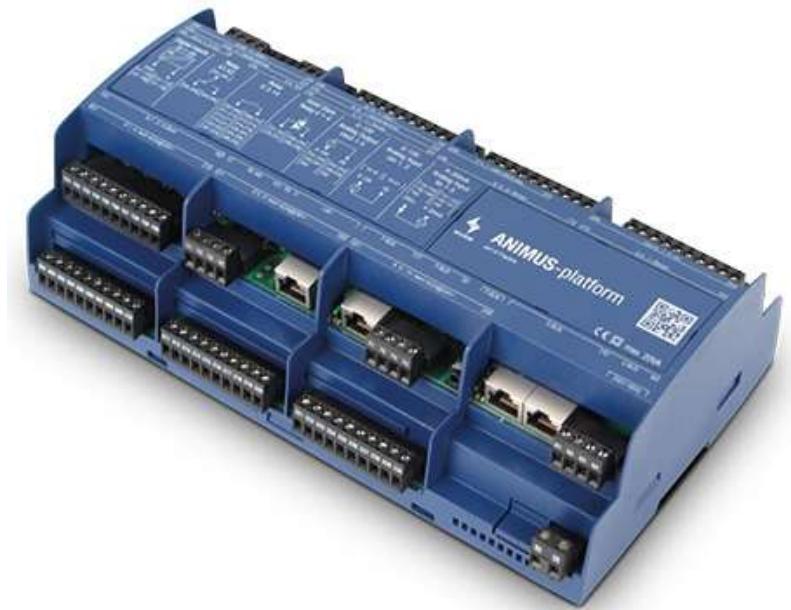
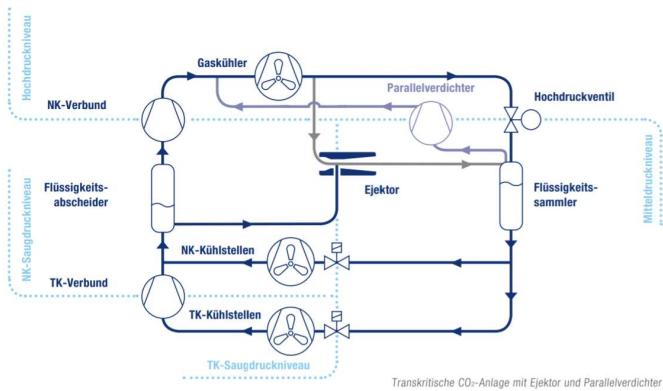
Digitale Steuerungs- und Regelungstechnik

Individuelle Ausführungen für Kältetechnik

[WURM]

Spezielle Anpassung auf Kältetechnische Anwendungen

- Gesamtanlagen-Steuergeräte
- Kühlstellenüberwachung
- Fernüberwachung
- Individuelle Regelspezifika von Kältemitteln (z.B. CO₂ mit Ejektoren)



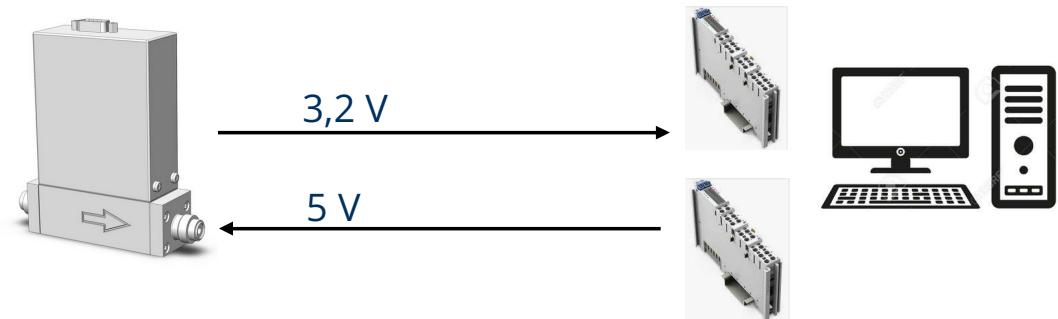
4 Kommunikation/Informationssystemtechnik

4 Kommunikation

Arten von Schnittstellen

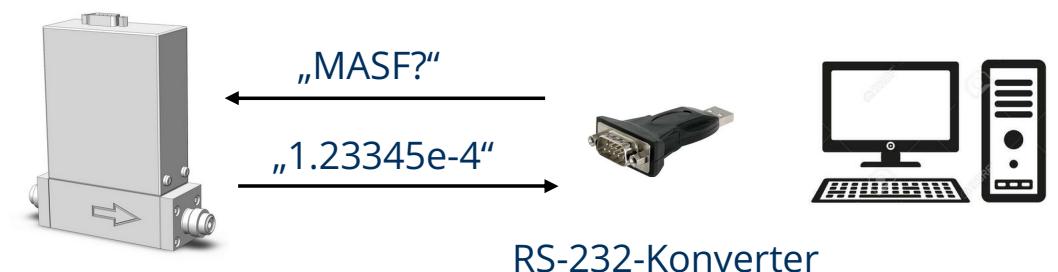
Analog

- 0 ... 10 V
- 4 ... 20 mA



Digital

- Ethernet
- RS232, RS485, USB, ...



4 Kommunikation

Analoge Schnittstellen – Übersicht

Arten

- Spannungssignale
- Stromsignale

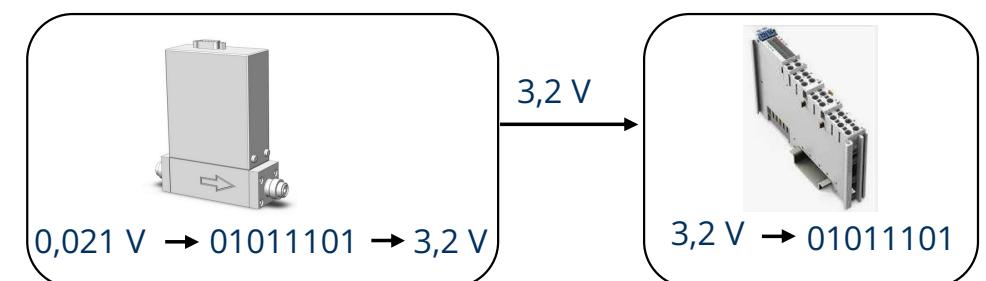
Herausforderungen

- Schmierung gegen Elektromagnetische Welle (z.B. Oberschwingungen von Umrichtern)
- Leitungslängen können Spannungssignale beeinflussen
→ Hochohmige Eingänge → geringere Empfindlichkeit
- Genauigkeitsverlust durch häufige AD/DA -Wandlung

Anwendung

- Verbindung mit SPS
- Auslesen von Sensoren (Druck, Massenstrom)
- Ansteuern von Regelventilen

	0 ... 10 V	-10 ... +10 V	0 ... 20 mA	4 ... 20 mA
Vorteile	Einfache Signalausgabe und Verarbeitung		Geringere Anfälligkeit bzgl. kapazitiver und Induktiver Einkopplung	
	Definierte „0“ (Drahtbruch erkennbar)			Definierte „0“ (Drahtbruch erkennbar)
				Versorgung des Sensors mit 4 mA möglich
Nachteile	Einfluss der Leitungslänge durch Spannungsabfall			



4 Kommunikation

Analoge Schnittstellen – Fehlerbeispiel



Keller Serie 33X

Druckbereiche	0...0,3 bis 0...1000 bar
Genauigkeit	$\pm 0,05\%FS$
Gesamtfehlerband	$\pm 0,1\%FS$ @ -10...80 °C
Schnittstellen	RS485, 4...20 mA, 0...10 V
Temperaturbereich	-20...125 °C

... und das ist nur die zusätzliche Abweichung im Sensor.

Performance

Druck

Nichtlinearität digital	$\leq \pm 0,02\%FS$	Kleinwerteneinstellung (BFSL)
Genauigkeit @ RT (20...25 °C)	$\leq \pm 0,05\%FS$	Nichtlinearität (Kleinwerteneinstellung BFSL), Druck-Hysterese, Nichtwiederholbarkeit, Nullpunkt- und Verstärkungsabweichung
Gesamtfehlerband (10...40 °C)	$\leq \pm 0,05\%FS$	Max. Abweichung innerhalb des kompensierten Druck- und Temperaturbereichs
Gesamtfehlerband (-10...80 °C)	$\leq \pm 0,1\%FS$	Max. Abweichung innerhalb des kompensierten Druck- und Temperaturbereichs
Kompensierter Temperaturbereich	10...40 °C -10...80 °C	Erweiterter Raumtemperaturbereich RT Optional andere Temperaturbereiche innerhalb -40...125 °C möglich
Zusätzliche Abweichung analoge Schnittstelle	$\leq \pm 0,05\%FS$	Bezogen auf Genauigkeit @ RT und das Gesamtfehlerband
Langzeitstabilität	Typ. $\pm 0,05\%FS$ Max. $\pm 0,10\%FS$	Pro Jahr bei Referenzbedingungen, jährliche Rekalibrierung empfohlen
Lageabhängigkeit	$\leq \pm 2\text{ mbar}$	Kalibriert bei vertikaler Einbaulage mit Druckanschluss nach unten
Auflösung	0,0005 %FS	Digital
Signalstabilität	0,0025 %FS	Digital noise-free
Interne Messrate	$\geq 1800\text{ Hz}$	Bei Version «3-Leiter + digital (0...10 V, 0...5 V)» > 6000 Hz
Druckbereichsreserve	$\pm 10\%$	Außerhalb der Druckbereichsreserve wird +Inf / -Inf angezeigt. Liegt ein Fehler im Gerät vor, wird NaN ausgegeben
Vakuumfestigkeit	Bei Betriebsdrücken $\leq 0,1$ bar abs. wird eine vakuumoptimierte Ausführung empfohlen	
Hinweis	Für Druckbereiche < 1 bar gelten alle Angaben bezogen auf ein Vollbereichssignal (FS) von 1 bar	

4 Kommunikation

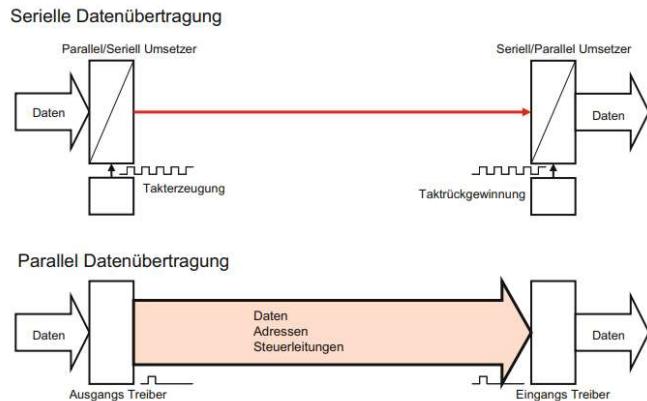
Digitale Schnittstellen

– Kurze Wiederholung

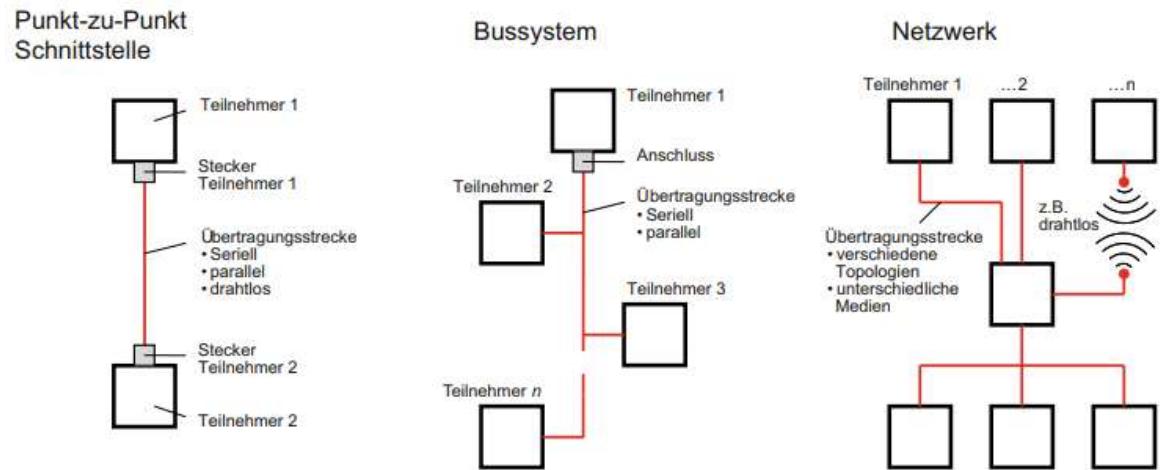
Begriffe

- Bit – Einstellige binäre Information („0“ oder „1“)
- Byte – Folge von 8 Bit
- Hexadezimalzahlen mit „0x“ gekennzeichnet

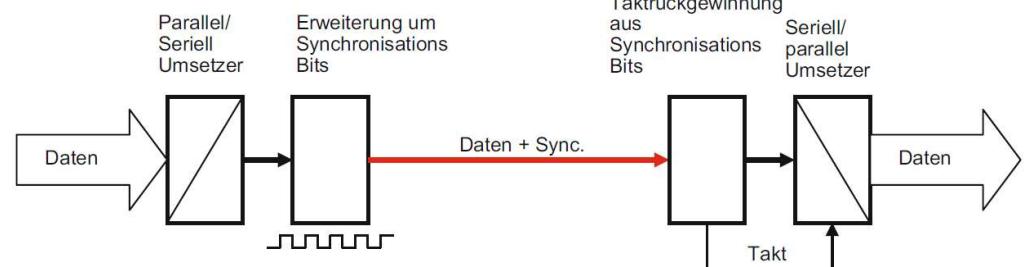
Übertragungsarten



Vernetzungsarten



Asynchrone Datenübertragung



[Herbig et al., Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, 2014]

4 Kommunikation

Digitale Schnittstellen im Vergleich

Feldbus

- Alter Standard in Kombination mit SPS
- Wahl des Protokolls i.d.R. hardwarebedingt
- Begrenzte Teilnehmerzahl

Digitale Schnittstellen – Beispiel

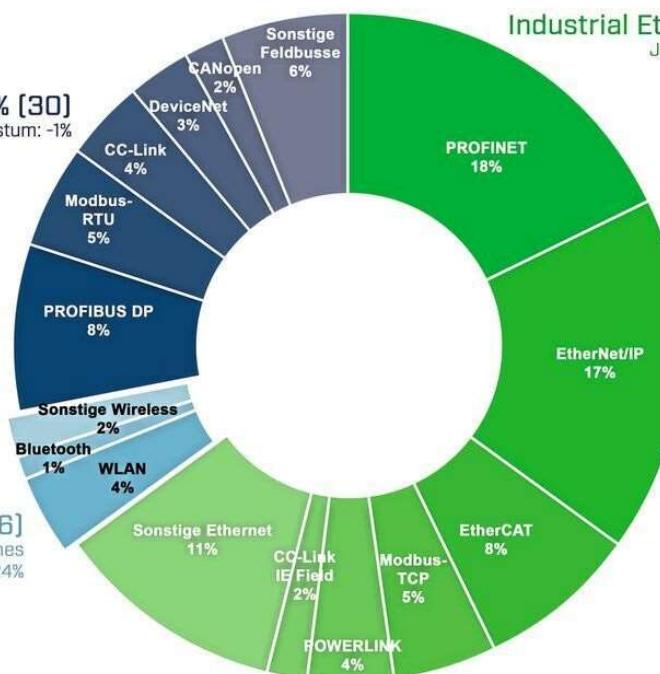


Wireless

- Flexibilität
- Kein Verdrahtung

Feldbusse: 28% [30] Jährliches Wachstum: -1%

Industrial Ethernet: 65% [64]
Jährliches Wachstum: +8%



Verbreitung von Kommunikationsverfahren
[von HMS in ET Automatisierung, 2021]

Ethernet

- Hohe Leistung
- Unbegrenzte Teilnehmeranzahl (IP-Adresse)
- Große Datenmengen
- Bessere Echtzeiteigenschaften
- Durchgängigkeit ins Internet/Fernzugriff
- Gleichwertiger Zugriff der Teilnehmer

4 Kommunikation

Ethernet - Überblick

Merkmal

- Spezifizierung für Hardware und Software Schnittstelle
- kabelgebunden

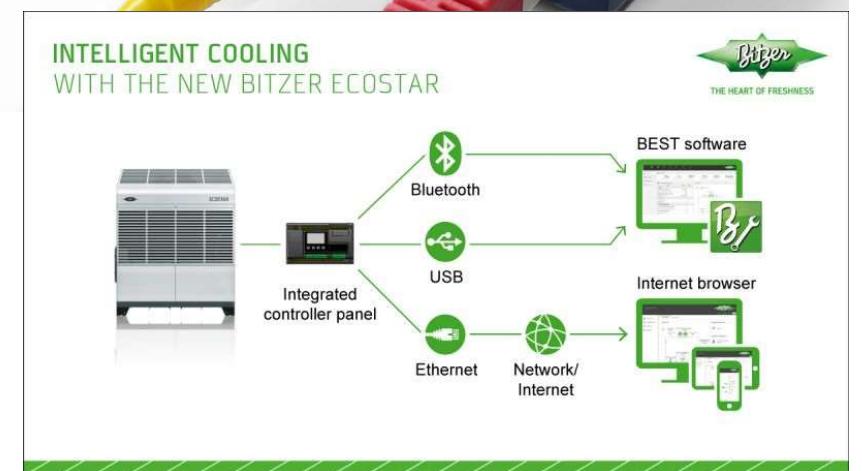
Eigenschaften

- Netzwerk mit Punkt-zu-Punkt Verbindung zw. Teilnehmer und Netzwerkverteiler (Switch)
- Stern oder ringförmige Netzwerkarchitektur
- Serielle Übertragung von Bits
- Ehemals asynchron jetzt synchrone Datenübertragung

Anwendung

- Verbindung Kühlstellenregler Anlagensteuerung
- Verbindung mit Internet (Fernüberwachung)

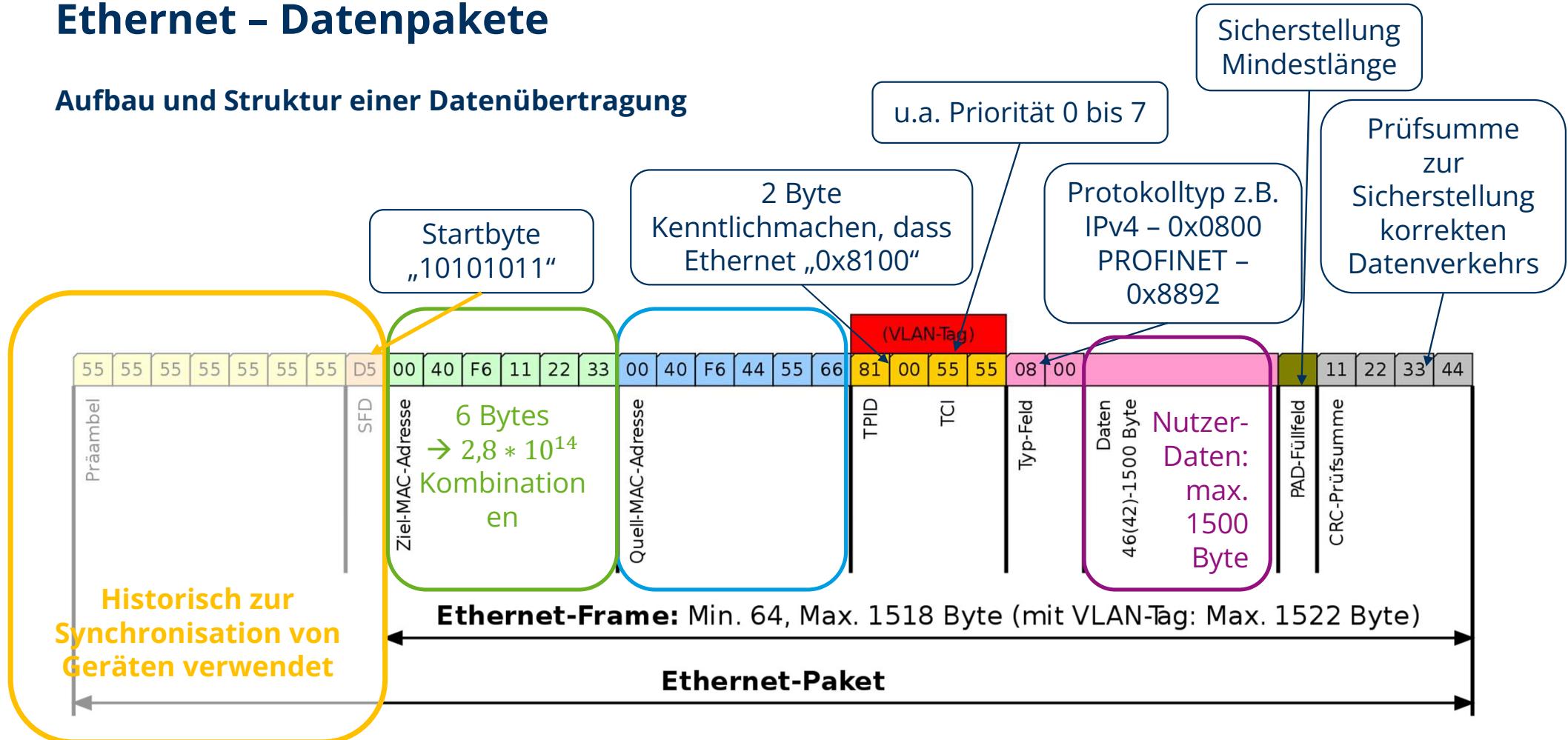
Ethernet-Switch [Wiki]



4 Kommunikation

Ethernet – Datenpakete

Aufbau und Struktur einer Datenübertragung



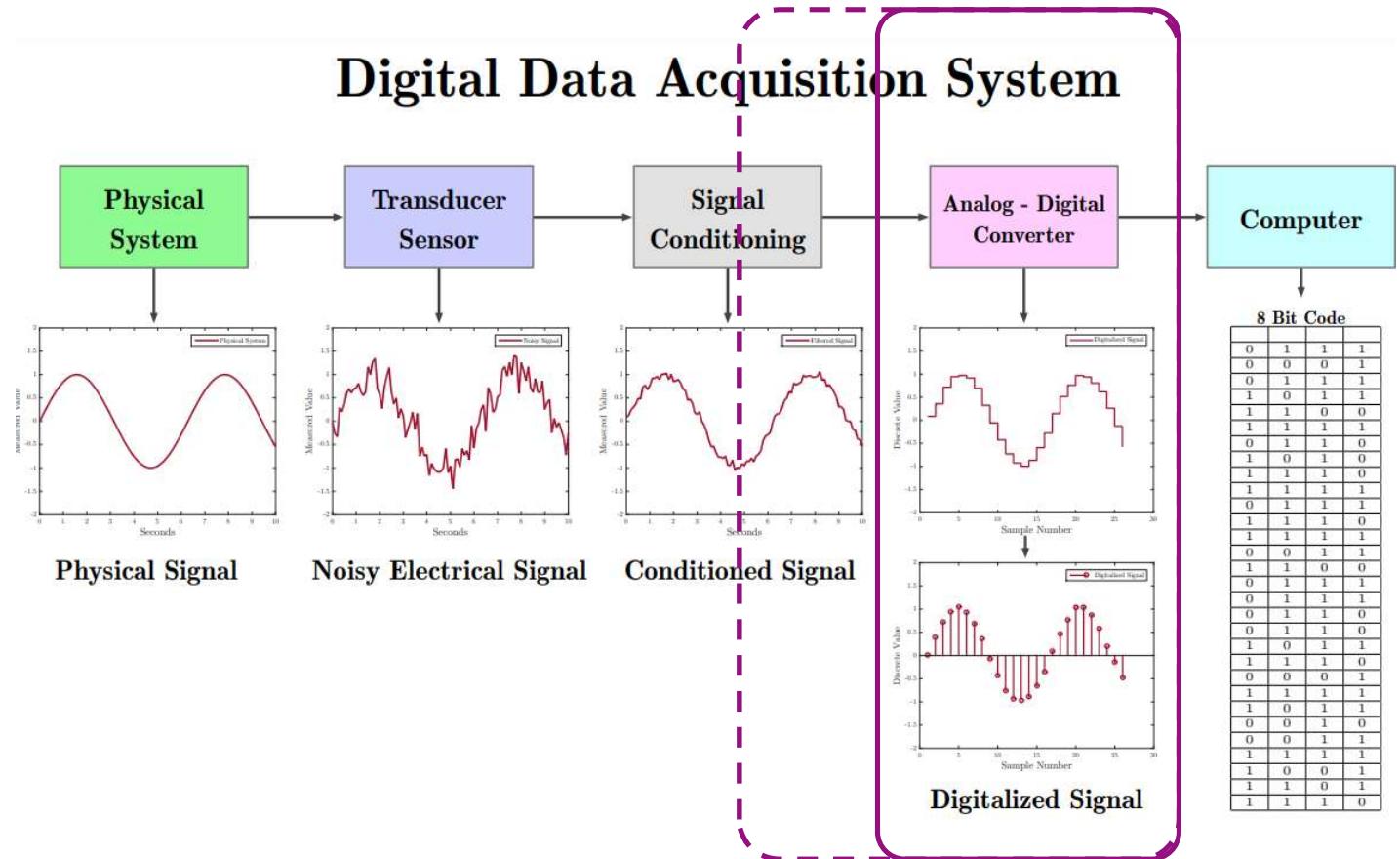
5 Datenerfassung (Data Acquisition – DAS/DAQ/DAU)

5 Datenerfassung

Überblick

Funktionalität

- Auslesen von Sensorik (Analog/Digital)
- AD-Wandlung von Signalen
- Evtl. Filtern, Angleich von Signalen (unterschiedliche Abtastraten etc.)
- Kommunikation mit Netzwerk/Rechner (Ethernet, Feldbus)
- Ansteuerung von Aktorik (Analog, Digital, Puls-Weiten-Modulation)



5 Datenerfassung Beispiele

NI Compact DAQ



WAGO I/O System 750/753



5 Datenerfassung

Software für Datenerfassung

Funktionalität

- GUI
- Auslesen und Visualisieren der Messdaten
- Implementierung von Steuerung und Regelung

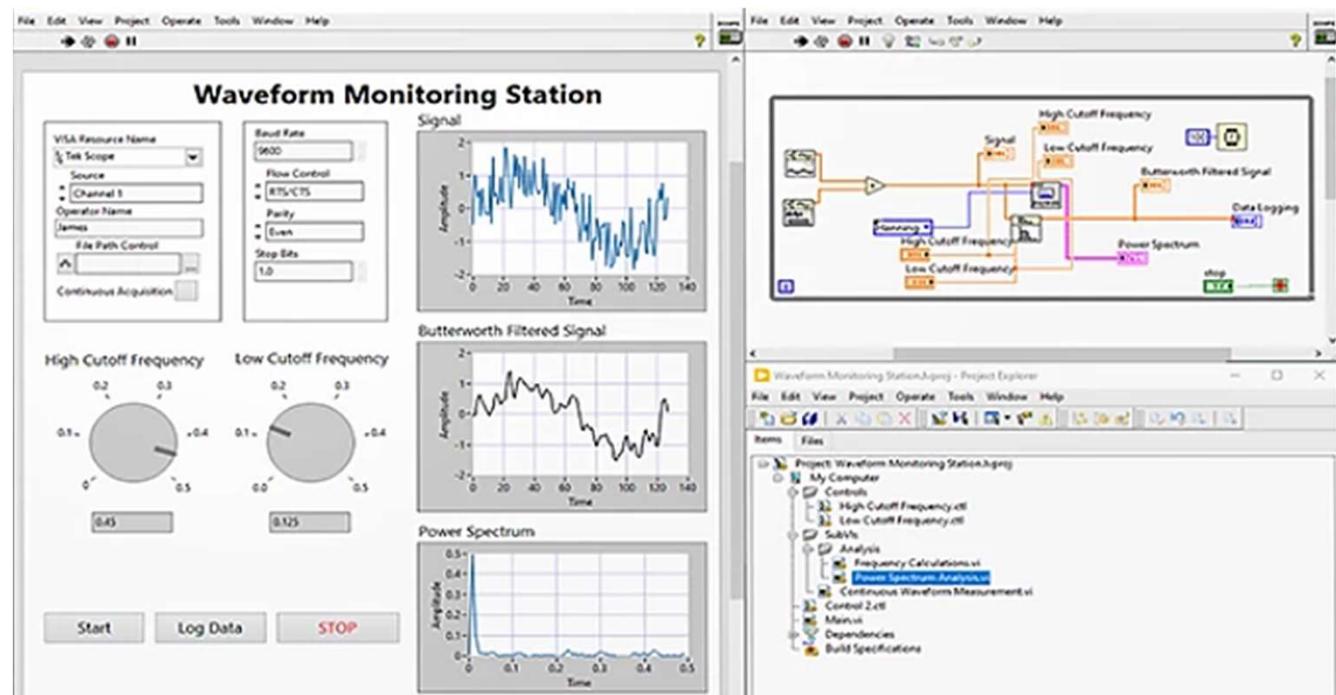
Software

- Herstellerspezifische Tools (z.B. WAGO I/O-Check)
- LabView
- Matlab
- Visual Basic
- Visual C++

LabView (von NI)

- Graphische Programmierung

LabView-Oberfläche [NI]



6 Schaltschrankaufbau

6 Schaltschrankaufbau Beispielanordnung

