

Elektrische Messtechnik

Vorlesung 4

Prof. Dr. Peter Weber

Wintersemester 2025/26

Im Studiengang Elektro- und Informationstechnik (B.Eng.)

Spielregeln in der Präsenz-Vorlesung

- Besuch der Vorlesungen erhöht die Chance auf eine gute Note bzw. Klausurbestehen
- Ihre Fragen und Anmerkungen gehen vor - Unterbrechen Sie mich gerne, wenn ich Ihre Meldung übersehen sollte
- Keine „Side Meetings“ in der Vorlesung - Paralleldiskussionen zu zweit verbreiten zu viel Unruhe
 - ➔ Fragen, Ideen oder Anmerkungen bitte immer in die große Runde – keine Hemmungen
 - ➔ Es gibt keine dummen Fragen - Niemand wird für eine Wortmeldung „augebuht“!
- Pünktlich erscheinen - Später hereintröpfelnde Teilnehmer verbreiten Unruhe
- Verlassen der Vorlesung bitte nur zur Pause oder zum Ende (logischerweise ausgenommen Toilettengänge)
- Am Ende der Vorlesung meinen letzten Satz vor dem Aufstehen abwarten.
- Telefone auf „leise“
- Ich wünsche mir immer Ihr Feedback – sofort in der Vorlesung oder gerne auch z.B. per mail

Organisation

Vorlesung:

Montag 08:15 h bis 11:30 h Raum: Hung C-101

Start 13.07.2025 - Ende 26.01.2026

Labor (Herr Michalik):

Montag 11:45 h bis 15:45 h Raum: 8-205

Terminorganisation bei Herrn Michalik

CampUAS – Vorlesung (P. Weber):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4525>

Weber: Elektrische Messtechnik - WiSe 25/26

Enrollment Key: alessandrovolta

CampUAS – Labor (R. Michalik):

<https://campuas.frankfurt-university.de/course/view.php?id=4433>

Michalik: Labor Elektrische Messtechnik - WiSe 25

Enrollment Key: MTLAB-WiSe2025

Wichtig: Vorbesprechung Labor – Termin Kommt von Herrn Michalik

Bitte unbedingt in beiden Kursen einschreiben (auch bei Herrn Michalik).

Sie verpassen sonst wichtige Infos bzw. werden bei der Laborterminvergabe nicht berücksichtigt

Messkette

Zum Beispiel:

- Energieversorgung
- Temperaturstabilisierung

Hilfsgeräte



Sensor

Analoge
Signalverarbeitung

AD-Wandler

Digitale
Signalverarbeitung

Ausgabe des
Messwertes

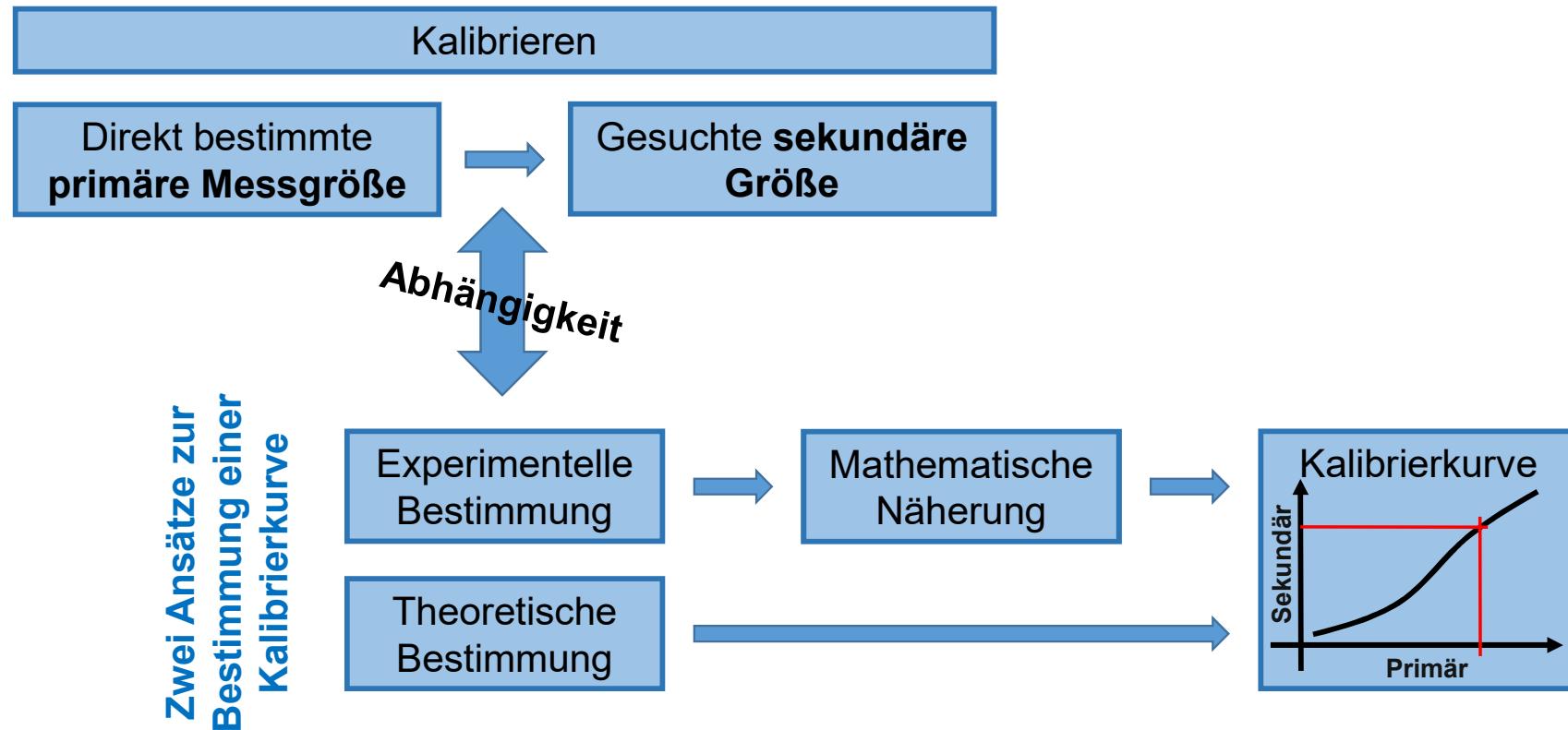
Zum Beispiel:

- Umwandlung in ein Spannungssignal
- Konditionierung auf den AD-Wandler
- Analoge Filter
- Verstärker

Zum Beispiel:

- Digitale Filter
 - Kalibrierkurve
- Umwandlung des primären in den sekundären Messwert
- Vergabe eines „Zeitstempels“

Kalibrierkurven



Kalibrierkurven

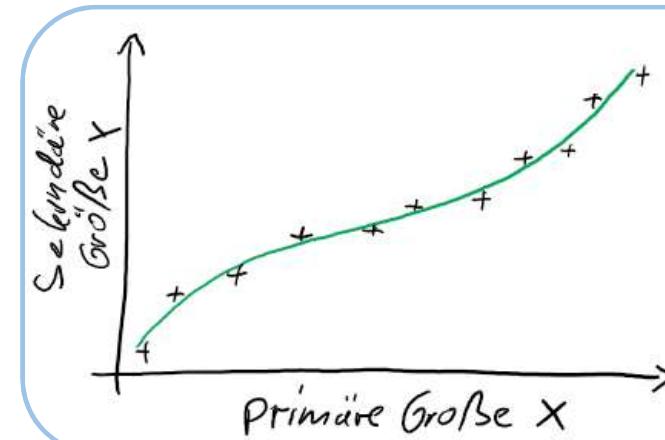
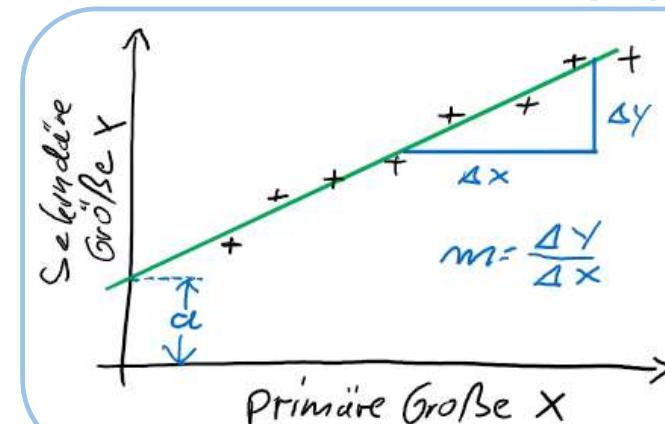
Messsysteme lassen sich rein theoretisch häufig nicht oder nicht ausreichend genau beschreiben.
Messsysteme verändern sich mit der Zeit.

Folglich spielt die experimentelle Bestimmung von Kalibrierkurven eine wesentliche Rolle.

Ermitteln einer Kalibrierkurve:

- Punktweise Zuordnung eines mit dem Messgerät ermittelten primären Wertes zur sekundären Größe.
- Bestimmung der sekundären Größe mit einem kalibrierten Messgerät ausreichender Genauigkeit.
- Interpolation der Messpunkte, um eine kontinuierliche Kurve zu erhalten.

In der Industrie unterliegen Messgeräte der Prüfmittelüberwachung, d.h. nach einem festen Plan müssen alle Messgeräte turnusmäßig kalibriert werden



Kalibrierkurven

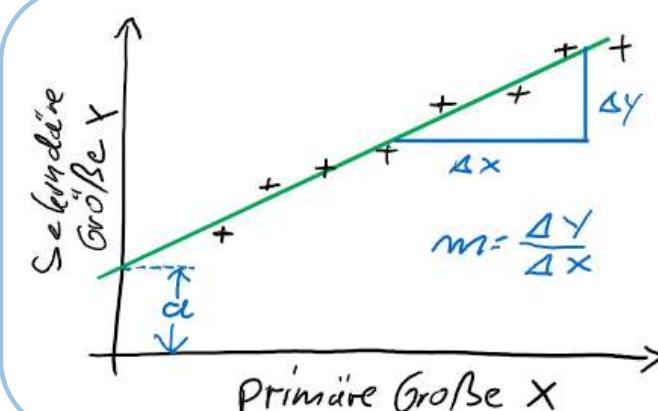
Einfachste Form der Interpolation: Lineare Regression

Mittelwerte $\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$ $\mu_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}$

Regressionsgerade

Steigung $m = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}$

Y-Achsenabschnitt $a = \mu_y - m \cdot \mu_x$



Kalibrierkurven

Beispiel 1:

Ein altes Temperaturmessgerät mit unbekanntem Messprinzip (Blackbox) zeigt die Temperatur auf einer analogen Skala in Skalenteilen an.

Mit einem zweiten kalibrierten Temperaturmessgerät wollen Sie die Anzeige in Skalenteilen so kalibrieren und beschriften, dass sie in Zukunft direkt die Temperatur ablesen können.

Nun haben Sie bei 5 verschiedenen Temperaturen die Anzeige des alten Messgerätes in Skalenteilen und den respektiven Messwert des kalibrierten Messgerätes in °C tabellarisch festgehalten.

- A) Stellen Sie die Datenpunkte graphisch dar.**
- B) Bestimmen Sie die Ausgleichsgerade graphisch (schätzen).**
- C) Bestimmen Sie die Ausgleichsgerade rechnerisch und zeichnen Sie diese dann in Ihrer Graphik ein.**
- D) Stellen Sie tabellarisch dar, wie die Temperaturschriftung Ihrer Skala für 5, 10, 15, 20 und 25 Skalenteile ausfällt.**

Steigung

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}$$

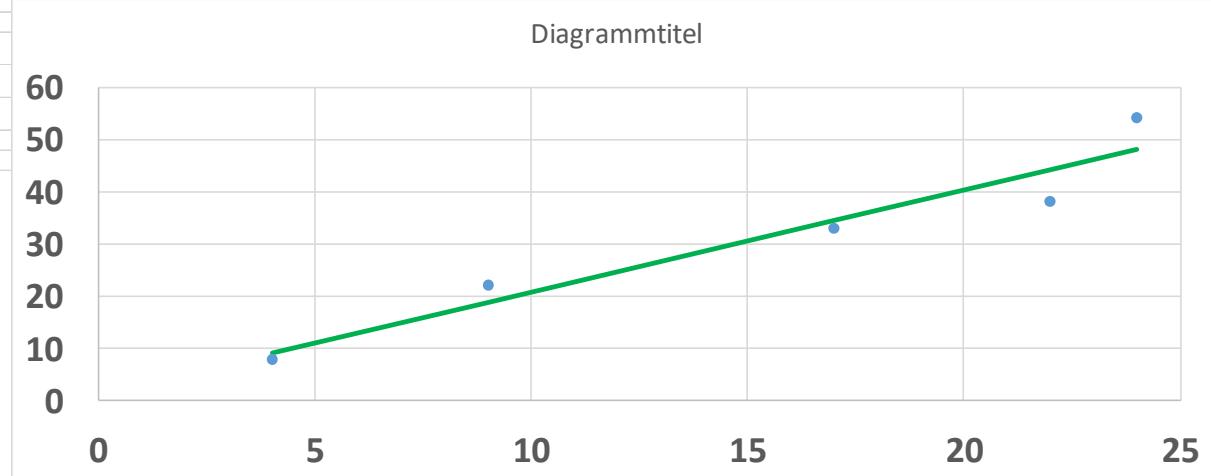
Y-Achsenabschnitt $a = \mu_y - m \cdot \mu_x$

Skalen- teile	°C
4	8
9	22
17	33
22	38
24	54

Kalibrierkurven

	Skalen-teile	T [°C]	$x_i - \mu_x$ [SKT]	$y_i - \mu_y$ [°C]	Summanden Zähler [SKT*°C]	Summanden Nenner [SKT^2]	Probe [°C]	Skalen-teile	m*SKT [°C]	T [°C]
	4	8	-11	-23	2,6E+02	1,3E+02	9	5	1,E+01	11
	9	22	-6	-9	6E+01	4E+01	19	10	19	21
	17	33	2	2	4E+00	3E+00	35	15	29	31
	22	38	7	7	5E+01	5E+01	44	20	39	40
	24	54	9	23	2E+02	8E+01	48	25	49	50
Summen		76	155		6E+02	2,9E+02	Summen			
	μ_x [SKT]	μ_y [°C]								
Mittelwert	15	31,0								
Steigung m	1,9	[°C/SKT)								
$m \cdot \mu_x$	30	[°C]								
Achsabschnitt a	1	[°C]			$a = \mu_y - m \cdot \mu_x$					

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}$$



Inter- / Extrapolieren

Randbemerkung:

Das Tool der linearen Regression können Sie auch in anderen Bereichen als nur zur Kalibrierung nutzen.

Sie können (vermutete) kausale Zusammenhänge untersuchen.

Beispiel 2:

Sie sind verantwortlich für einen Hochpräzisions-Fertigungsbereich. Bei 20 °C zählen Sie 15 Ausschussteile pro Stunde, bei 22 °C sind es 18 und bei 25 °C sind es 24 Ausschussteile pro Stunde.

Vermutung:

Die steigende Temperatur führt zu einer Erhöhung des Ausschusses.

Extrapolation:

Sie möchten nun wissen, wie viel Ausschuss Sie im kommenden Sommer bei 30 °C erwarten können.

Berechnen Sie dies mithilfe der gerade kennen gelerneten Ausgleichsgeraden

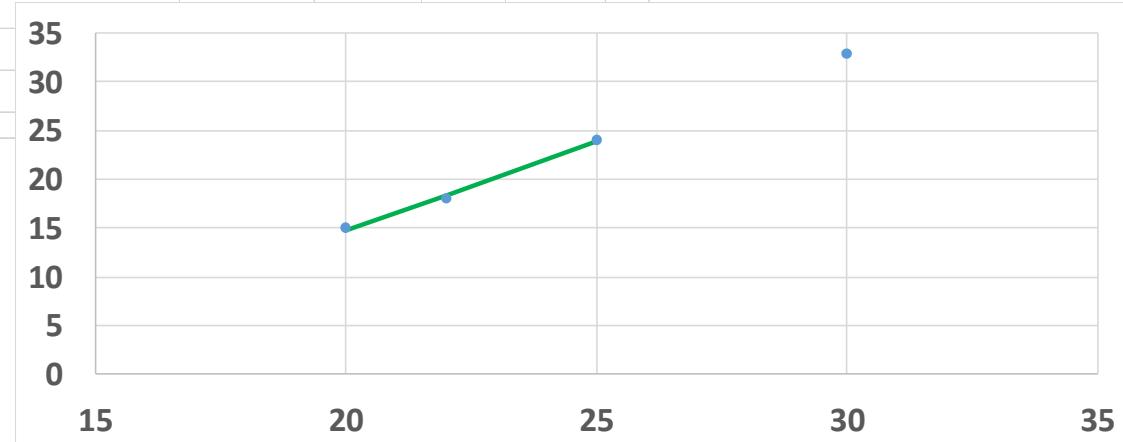
Oft nur Näherungen:

Die Datenlage ist in diesem Falle allerdings sehr dünn und es ist fragwürdig, ob der Zusammenhang wirklich linear ist. Dennoch kann eine solche Extrapolation mangels weiterer Daten die beste Näherung sein.

Kalibrierkurven

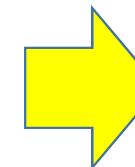
	T [°C]	#	$x_i - \mu_x$ [°C]	$y_i - \mu_y$ [#]	Summanden Zähler [°C*#]	Summanden Nenner [°C^2]	Probe [#]				
	20	15	-2	-4	9	5	15				
	22	18	0	-1	0	0	18				
	25	24	3	5	1,E+01	7	24				
Summen	67	57						30	5,E+01	33	
	μ_x [°C]	μ_y [#]			2,E+01	1,E+01	Summen				
Mittelwert	22	19									
Steigung m	2 #/°C										
$m \cdot \mu_x$	4,E+01	#									
Achsabschnitt a	-22 #				$a = \mu_y - m \cdot \mu_x$						

$m = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2}$



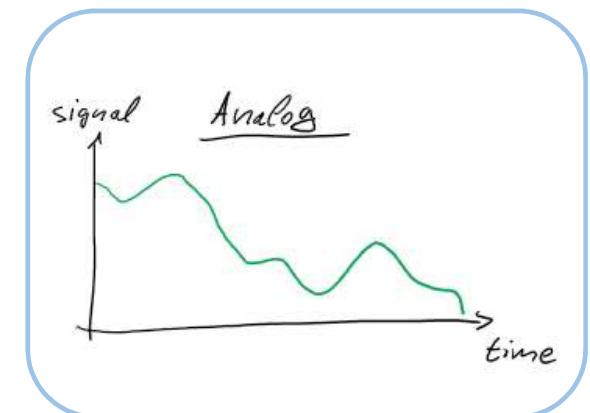
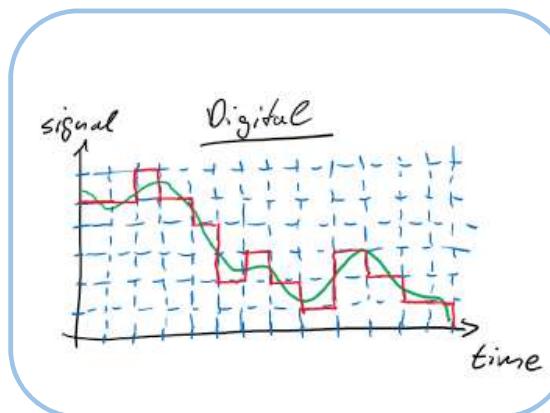
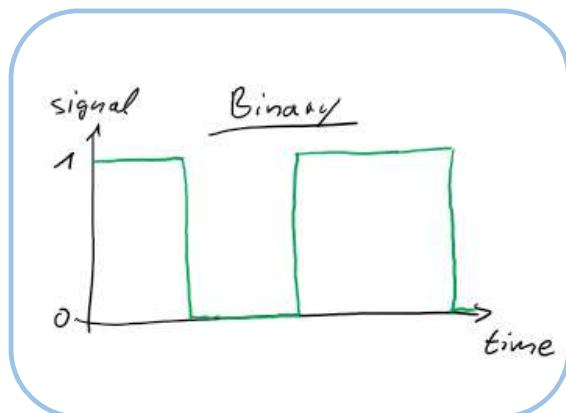
Darstellung von Messsignalen

- Output einer Messung ist ein Messsignal
- Ein Messsignal ist eine in der Regel zeitlich veränderliche Information



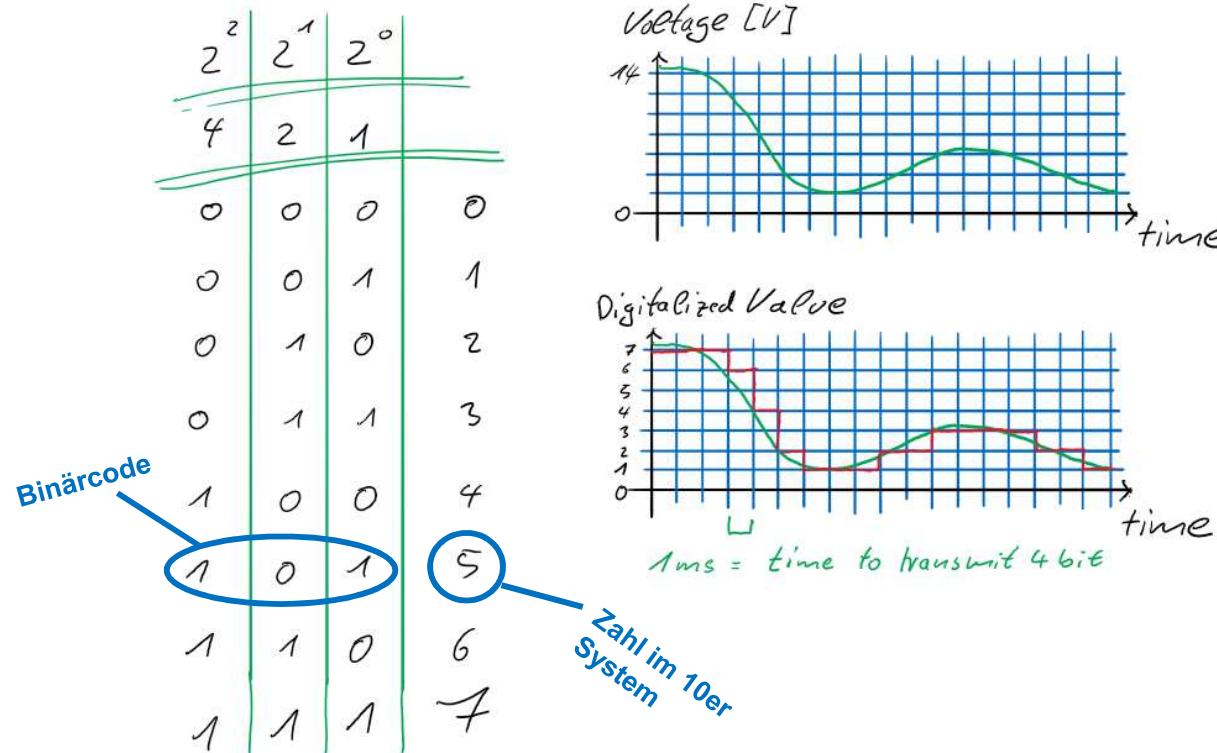
Arten von Messsignalen:

- Analoge Signale
- Digitale Signale
- Binäre Signale



Digitalisierte Messsignale

Digitalisierung eines 0-14 V Spannungssignales mit 3 Bit



Es können die diskreten Zahlen von 0 bis 7 dargestellt werden.

Das 0-14 V Signal muss in 7 Schritte aufgeteilt werden:

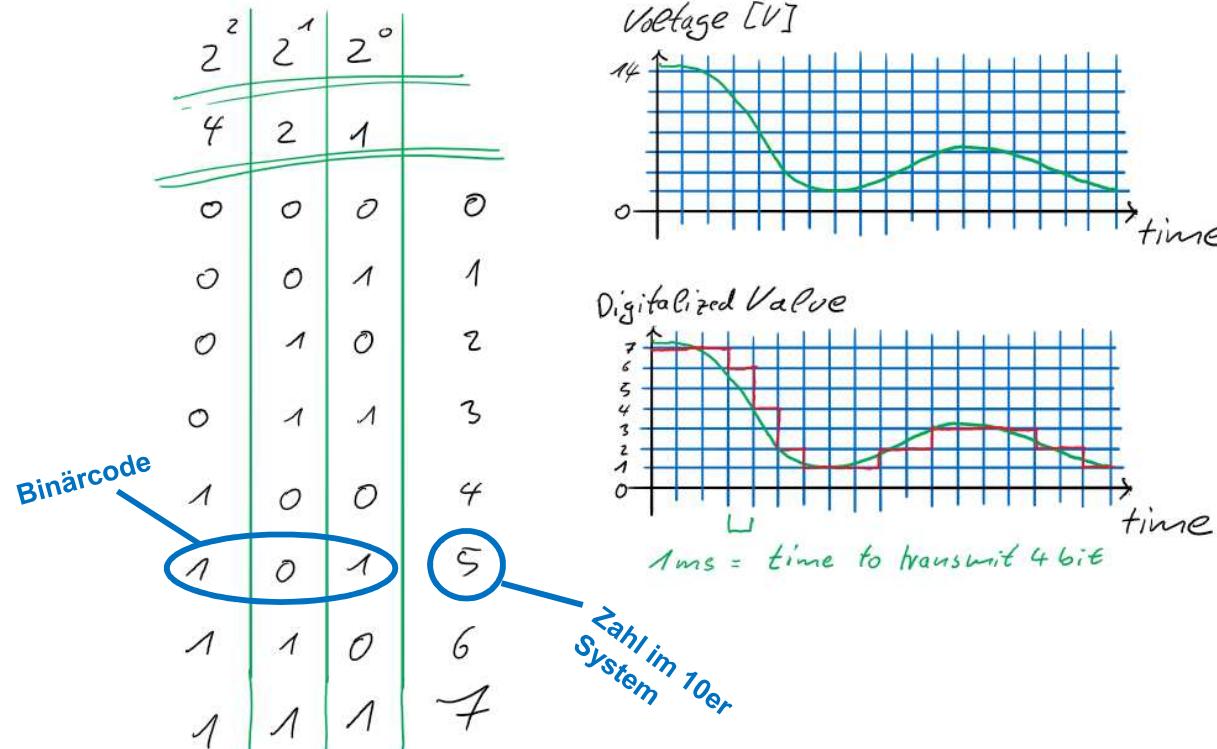
$$\frac{14V}{7} = 2V$$

Es kann also maximal die Schrittweite von 2 V aufgelöst werden.

Mit anderen Worten: Bei der AD Wandlung geht ggf. Genauigkeit verloren.

Digitalisierte Messsignale

Digitalisierung eines 0-14 V Spannungssignales mit 3 Bit



Allgemein gilt für die Auflösung ΔU eines mit n binären Stellen digitalisierten Spannungssignals:

$$\Delta U = \frac{U_{max}}{2^n - 1}$$

Man spricht in dem Zusammenhang auch vom Diskretisierungsfehler.

03.11.2025

Digitalisierte Messsignale

Aufgabe:

Betrachten Sie nun ein Messsystem, welches Ihnen proportional zum Messwert ein analoges Signal zwischen 0 und 5 V ausgibt.

Bestimmen Sie die Auflösung der AD-Konversion, wenn Sie ein 4 Bit System verwenden.

4-bit-Signal

Digitalization

2^3	2^2	2^1	2^0	
8	4	2	1	
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	0	0	0	8
1	0	0	1	9
1	0	1	0	10
1	0	1	1	11
1	1	0	0	12
1	1	0	1	13
1	1	1	0	14
1	1	1	1	15

Consider a 0..5V analog output voltage to be converted into a 4-bit digital signal.

The maximum representable number in 4-bit is 15.

Thus, the maximum possible output voltage of 5V is represented by 15 [1111].

$$5V \stackrel{!}{=} 15$$

$$\Rightarrow \frac{5V}{15} \stackrel{!}{=} 1$$

$$\Rightarrow \frac{1V}{3} \stackrel{!}{=} 1 \quad [0\ 0\ 0\ 1]$$

The resolution of this A/D conversion with 4-bit bandwidth is 0.33V.