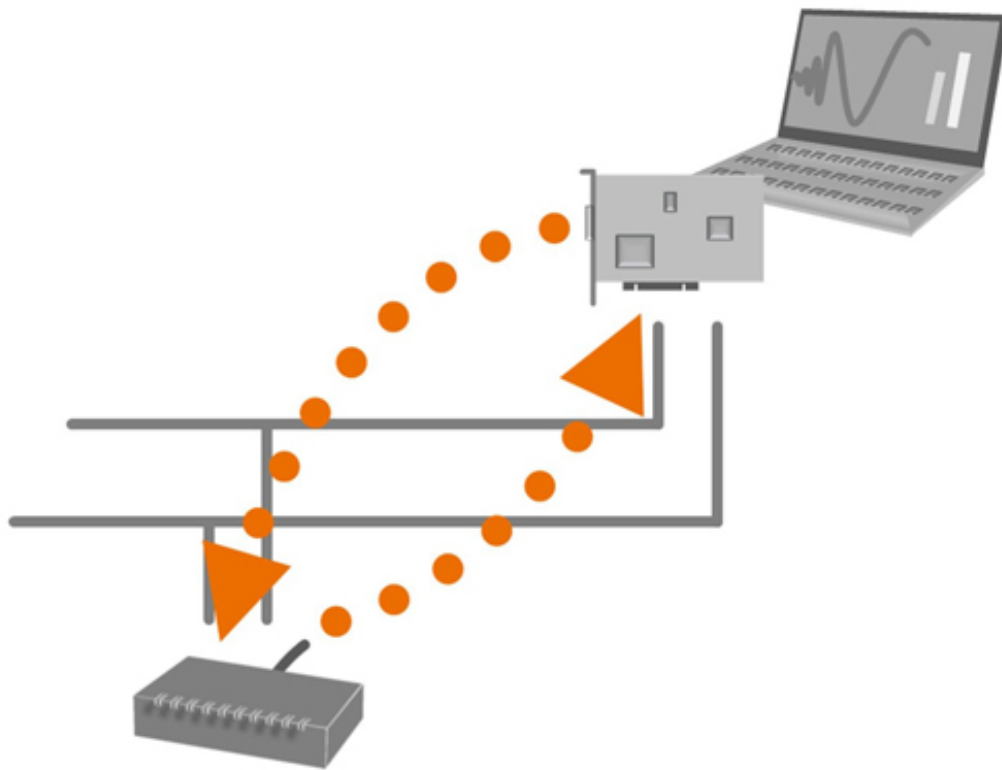


Jörg Böttcher

Kompendium Messdatenerfassung und -auswertung



Ein Grundlagenüberblick
für Studium und Beruf

Autor:

Professor Dr.-Ing. Jörg Böttcher

Universität der Bundeswehr München

www.prof-boettcher.de

Inhalt

Vorwort

Vom Messort zur Messdaten-Applikation

Messgrößen, Messwerte und Messdaten

Aufgaben bei der Messdatenerfassung

Aufgaben auf Computerseite

Systemlösung mit EinSteckkarte

Systemlösung mit externem Modul

Systemlösung mit externen Bussen

Messwerte digitalisieren

Die Analog-Digital-Umsetzung

Auflösung, Umsetzzeit und Aufwand

Quantisierungsabweichung

Quantisierungsrauschen

Nullpunkt-, Verstärkungs- und

Linearitätsabweichungen

Digitalisierung dynamischer Signale

Das Abtasttheorem

Messkomponenten

PC-Einsteckkarten

PC-Busse

Externe Messmodule

Typische Messgrößen bei PC-Einsteckkarten und externen Messmodulen

Sensor mit Busanschluss
Messgerät mit Busanschluss

Laborbus

IEEE 488 und GPIB

Systemaufbau

Handshaking

Schnittstellen-Nachrichten nach IEEE 488.1

Geräte-Nachrichten nach IEEE 488.2

Kommandosprache SCPI

USB

Topologie

Bussignale und Datenraten

Enumeration und Geräteklassen

USB-Transfers

Transfertypen

Feldbusse

Grundsätzliche Struktur von Feldbussen

Anwendungsklassen und verbreitete
Feldbussysteme

Beispiel PROFIBUS

Die Busphysik von PROFIBUS

Die Kommunikationstechnologie von PROFIBUS

PROFIBUS-Profile

Beispiel CAN

Die Busphysik von CAN

Die Kommunikationstechnologie von CAN

CANopen und andere CAN-Erweiterungen

Ethernet

Die Topologie von Ethernet

Die Busphysik von Ethernet

Das Ethernet-Telegramm

Das Buszugriffsverfahren von Ethernet

Das Netzwerk-Protokoll IP

Routing bei IP

Das Transport-Protokoll TCP

UDP als Einfachst-Transport-Protokoll

Das Anwendungs-Protokoll HTTP

Weitere Anwendungs-Protokolle

Industrial Ethernet

Die Messdaten-Applikation

Bestandteile der Messdaten-Applikation

Beispiel LabVIEW

Statistische Messdatenauswertung

Histogramme, Dichte- und Summenfunktion

Stetige und quasi-stetige Verteilungen

Statistische Kenngrößen

Normalverteilung

Interpolationen und Regressionen

Interpolationen

Regression

Numerisches Differenzieren und Integrieren

Differenzieren

Integrieren

Digitale Filter

Nichtrekursive Filter

Rekursive Filter

Korrelationsfunktionen

Korrelationskoeffizient

Kreuzkorrelationsfunktion

[Korrelation](#) verrauschter Signalfolgen

Detektion gestörter Signalmuster

Spektralanalyse

[Spektren periodischer Signale](#)

[Spektren nichtperiodischer Signale](#)

Diskrete Fourier-Transformation

[Beispiele für Amplitudenspektren](#)

Spektrumsfehler und Fensterfunktionen

Leistungsdichtespektrum

[Literaturverzeichnis](#)

[Bildverzeichnis](#)

[Abkürzungen](#)

[Sachwortverzeichnis](#)

Vorwort

Ob in der Produktionsanlage, im Prüfstand oder im Labor - stets sind vor Ort zahlreiche Messdaten zu gewinnen und in Computer zu übertragen, wo sie weiterverarbeitet werden. Dieses Buch behandelt die hierbei grundsätzlich in Frage kommenden Systemstrukturen und die diesen zugrunde liegenden Funktionsmechanismen.

Unsere Betrachtungen beginnen mit der Messwernerfassung vor Ort, wozu unterschiedliche Messkomponenten wie PC-Einsteckkarten, externe bzw. busbasierte Messmodule, Sensoren mit Busanschluss oder vernetzbare Messgeräte dienen können. Wir werden hierbei auch einige für die praktische Anwendung bedeutsame Grundlagen der Digitalisierung von Messgrößen betrachten. Es geht weiter zu den unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen, die zur Messdatenübertragung benutzt werden können. Diese sind der Laborbus, USB, Feldbusse und Ethernet (LAN), wobei bei letzterem auch die höheren Protokolle (z.B. IP, TCP, UDP, HTTP) sowie Industrial Ethernet-Aspekte dargestellt werden. Schließlich geht es in die Messdaten-Applikation im Computer hinein, wo wir die üblichen Standardverfahren der Messdatenauswertung betrachten; darunter fallen statistische Auswertungen, Interpolationen und Regressionen, numerisches Differenzieren und Integrieren, digitale Filter, Korrelationsfunktionen und die Spektralanalyse.

Dieses Buch ist als Kompendium ausgelegt. Der Autor hat sich bemüht, die Zusammenhänge kompakt und verständlich darzustellen, ohne wichtige Details zu unterschlagen. Als Grundlagenüberblick ist das Buch zwischen rein akademischer Theorie und ausschließlich gerätebezogener Implementierungspraxis angesiedelt. Es möchte auf effiziente Art das notwendige Basis-Know-how vermitteln, um Lösungen für die Messdatenerfassung und -auswertung zu verstehen und selbst zu planen.

Das Buch wendet sich einerseits an Studierende und Lehrende in technischen Bachelor- und Masterstudiengängen, die mit diesbezüglichen Fragestellungen in Lehrveranstaltungen oder studentischen Arbeiten (Abschlussarbeiten, Praktika, Studienarbeiten) befasst sind. Gleichmaßen sind diejenigen adressiert, die in weiterführende technische Ausbildungen involviert sind z.B. an Techniker- und Meisterschulen. Andererseits werden im Beruf stehende Ingenieure, Informatiker und Techniker angesprochen, die mit Aufgaben der Messdatenerfassung und -Verarbeitung zu tun haben, beispielsweise in Produktion, Prüffeld und Entwicklung.

Der Autor hat eine Professur für Regelungstechnik und Elektrische Messtechnik an der Universität der Bundeswehr München inne. Mit der in diesem Buch behandelten Thematik beschäftigt er sich außer in einer einschlägigen Lehrveranstaltung in vielen Projekten mit Studierenden. Parallel dazu führt er laufend industrielle Kooperationsvorhaben bevorzugt mit mittelständischen Unternehmen durch. Für weitere Informationen sei auf die Website des Autors www.prof-boettcher.de verwiesen.

Ich wünsche allen Lesern und Leserinnen viel Freude bei der Lektüre.

München/Neubiberg, im August 2015

Jörg Böttcher

Vom Messort zur Messdaten- Applikation

In den meisten automatisierten technischen Systemen werden mehr oder weniger viele Messdaten erfasst und verarbeitet. Ob in einer industriellen Produktionsanlage, einem Messaufbau im Labor oder im Automobil - Messdaten bilden die Grundlage für entsprechende Überwachungs- und Regelungsprozesse. Wir wollen uns in diesem einführenden Kapitel mit den grundlegenden Aufgaben und Lösungsstrukturen beim Umgang mit Messdaten beschäftigen.

Generell gehen wir dabei davon aus, dass Messdaten nach ihrer messtechnischen Erfassung und Übertragung durch einen Computer verarbeitet werden. Ein Computer kann hierbei ein konventioneller PC oder Laptop sein, ein mobiles Gerät (wie Tablet, Smartphone) oder eine beliebige andere programmierbare Elektronik. Zu letzterer gehören insbesondere die sog. Embedded Systems. Man versteht darunter von der Bauform her meist recht kompakt ausgeführte Computer ohne Tastatur und Bildschirm, die in technische Systeme eingebettet (engl. embedded) werden und entsprechende Steuer- und Regelungsvorgänge durchführen. Die im modernen Automobil vielfach vorhandenen Steuergeräte sind ein Beispiel hierfür.

Messgrößen, Messwerte und Messdaten

Die Gewinnung von Messdaten setzt zunächst die Messung entsprechender Messgrößen mittels unterschiedlichster Messkomponenten voraus. So erfolgt dies im Labor häufig mit entsprechenden Labormessgeräten wie Multimeter, Oszilloskop oder Spektralanalysator, denen elektrische Messgrößen wie Spannungen oder Ströme zugeführt werden. In der Produktionsmaschine oder im Automobil müssen dagegen oftmals nitelektrische Messgrößen (Temperaturen, Drücke, Positionen etc.) mit entsprechenden Sensoren aufgenommen werden.

Die Messgröße ist üblicherweise analoger (stetiger) Art, kann also zwischen einem Bauart-bedingten Minimal- und Maximalwert jeden beliebigen Zwischenwert annehmen. Eine Ausnahme bilden beispielsweise Schalter oder Lichtschranken, die in manchen Messdatenerfassungsanwendungen ebenfalls abgefragt werden müssen, was aufgrund ihrer nur zwei Zustände „Ein“ und „Aus“ jedoch aus messtechnischer Sicht trivial ist -man spricht hier von binären oder allgemein unstetigen Messgrößen.

Die Messkomponente gewinnt aus der Messgröße einen Messwert. Wie dies für einzelne Messgrößen physikalisch und schaltungstechnisch erfolgen kann, ist Thema des Fachgebiets Messtechnik und soll uns in diesem Kompendium nicht beschäftigen. Auch die dabei naturgemäß immer zu beobachtenden Abweichungen des ermittelten Messwerts vom exakt herrschenden - die hoffentlich auf ein Maß beschränkt bleiben, das für die konkret realisierte Anwendung noch ausreicht - sollen hier außen vor bleiben.

Um durch ein computerbasiertes Messdatenerfassungssystem verarbeitet zu werden, müssen

die Messwerte in digitaler Form vorliegen. Sie müssen digitalisiert werden. Angelehnt an die Begrifflichkeiten in der Informationstechnologie sprechen wir nunmehr von Messdaten. Der Singular Messdatum wird aufgrund der Verwechslungsgefahr mit dem Kalenderdatum nicht verwendet; meist bleibt man dann auch hier beim Begriff Messwert.

Aufgaben bei der Messdatenerfassung

Jede für die Messdatenerfassung geeignete Messkomponente muss die Aufgaben nach [Bild 1](#) durchführen, ggf. in Kombination mit Zusatzkomponenten. Wir werden unten noch auf verschiedene Lösungen hierfür eingehen. Wir setzen hierbei voraus, dass stets ein elektrisches Eingangssignal anliegt, das entweder direkt die elektrische Messgröße trägt oder im Falle einer nichtelektrischen Messgröße durch einen Sensor gewonnen wurde. Die Messkomponente befindet sich typischerweise nicht weit vom Messort, an dem die Messgröße abgegriffen wird.

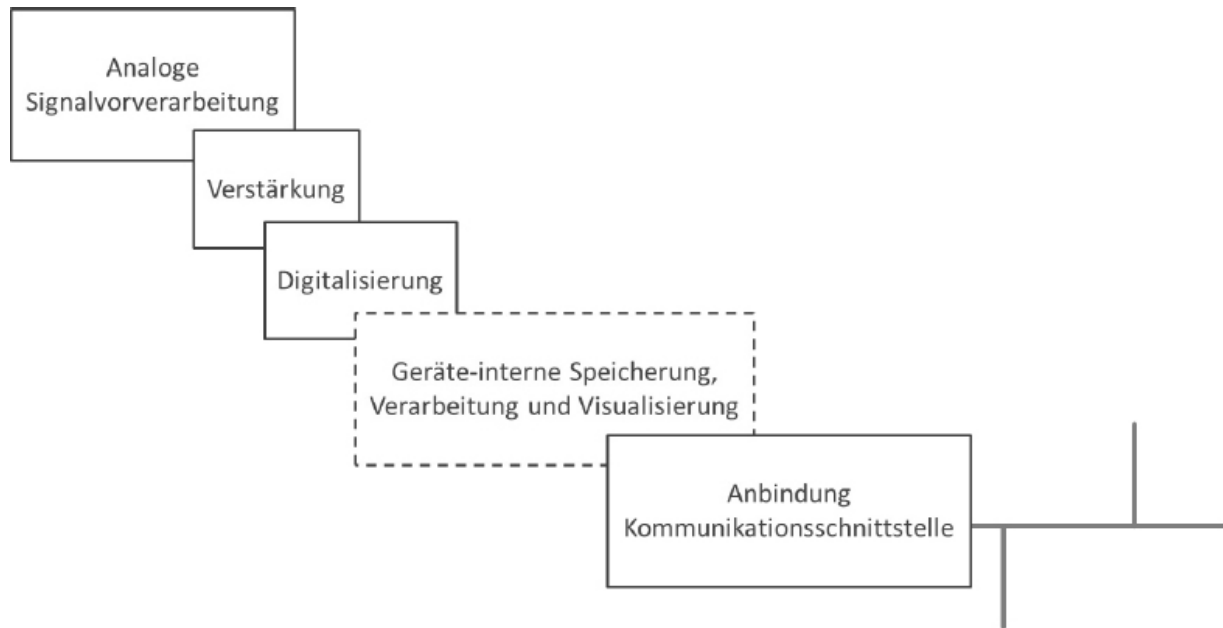


Bild 1: Aufgaben bei der Messdatenerfassung

Je nach Eigenschaften des elektrischen Eingangssignals wird oftmals zunächst eine gewisse analoge Signalvorverarbeitung durchgeführt. Hierbei kommen meist passive elektronische Schaltungen wie Filter, Brückenschaltungen oder Signalwandler zur Anwendung. In vielen Fällen ist das resultierende Signal in seinem Signalhub - definiert als der Unterschied zwischen dem größten und dem kleinsten Signalwert - für eine qualitativ hochwertige Weiterverarbeitung noch zu klein und muss verstärkt werden. Es folgt die Digitalisierung, auf die wir im nächsten Kapitel noch im Detail eingehen werden.

Je nach Art der Messkomponente erfolgt optional eine Zwischenspeicherung der dabei entstehenden Messdaten bzw. auch bereits eine Verarbeitung und Visualisierung, was im Bild durch einen gestrichelten Funktionsblock gekennzeichnet ist. Dies ist insbesondere bei Labormessgeräten der Fall, die oftmals autark eingesetzt werden, ohne in eine übergreifende Messdatenerfassungsanwendung integriert zu sein. Um von

einem externen Computer auf die so gewonnenen (und ggf. vorverarbeiteten) Messdaten zugreifen zu können, muss die Messkomponente über eine entsprechende Kommunikationsschnittstelle verfügen. Auch diese wird im weiteren Verlauf dieses Kompendiums noch intensiver betrachtet. Die üblicherweise heute verwendeten Kommunikationsschnittstellen erlauben den Anschluss mehrerer Geräte an einem gemeinsamen Kommunikationsmedium.

Aufgaben auf Computerseite

Nach der Übertragung über die Kommunikationsschnittstelle werden die Messdaten aus allen an der jeweiligen Anwendung beteiligten Messkomponenten im Computer eingelesen und weiterverarbeitet. Dies erfolgt auf Computerseite wie in [Bild 2](#) dargestellt.

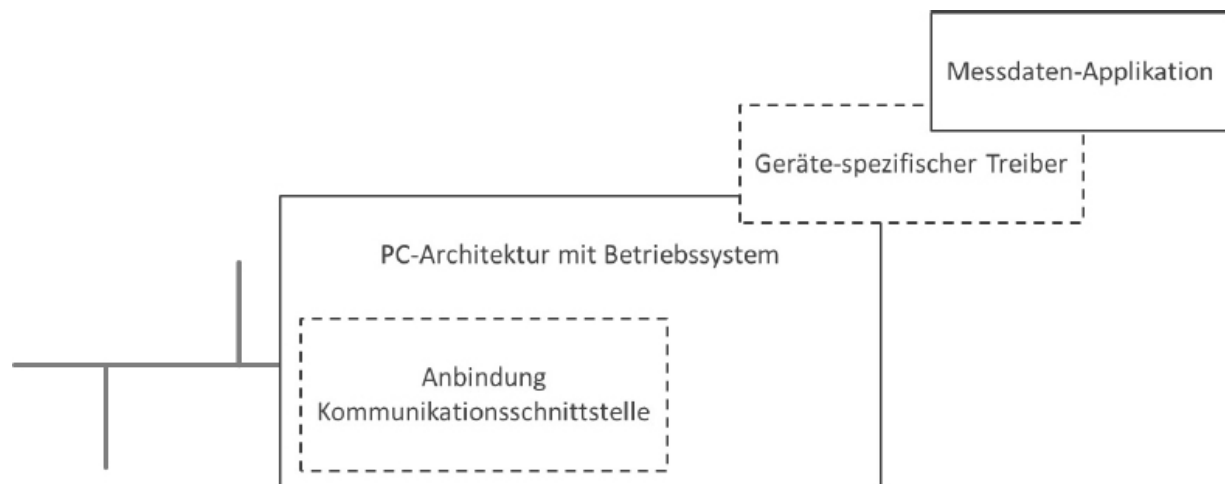


Bild 2: Aufgaben auf Computerseite

Im Bild wird wie auch im weiteren Verlauf dieses Kompendiums von einem Computer mit PC-Architektur ausgegangen. Insbesondere im Bereich der Embedded Systems besteht ein starker Trend zum Einsatz sog.

Embedded PCs, so dass auch für diesen Bereich diese Annahme immer mehr zutrifft. Auf Computer mit anderer Hardwarebasis - so beispielsweise vielen Mikrocontrollersystemen - lassen sich die Überlegungen jedoch analog übertragen.

Heute übliche PC-Architekturen verwenden als Basis der installierten Softwareanwendungen ein Standardbetriebssystem wie Windows oder eines der vielen Linux-Derivate. Sofern die in der Messdatenerfassungsanwendung verwendete Kommunikationsschnittstelle nicht einer Standard-PC-Schnittstelle wie USB oder LAN bzw. WLAN entspricht, muss diese über eine separate Hardwarekomponente zuerst an den PC angebunden werden. Dies beinhaltet in aller Regel auch die Installation entsprechender Treibersoftware hierzu.

Die unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen sind in entsprechenden technischen Standards einheitlich spezifiziert. Manche Standards umfassen nur den Datentransport selbst, ohne die transportierten Daten in ihrer Bedeutung und Darstellung festzuschreiben. Andere dagegen legen - meist in Form sog. Geräteprofile - die Daten, die eine bestimmte Geräteart senden bzw. empfangen kann, bis ins Detail fest. In letzterem Fall erfolgt die Bekanntmachung der Datenstruktur eines bestimmten Geräts im Computer oftmals durch die Installation eines gerätespezifischen Treibers.

Ziel der Messdatenerfassung ist letztlich die Messdaten-Applikation, eine Softwareanwendung, welche die Messdaten verarbeitet, visualisiert und speichert. Sie kann mit einer beliebigen für den verwendeten Computer geeigneten Programmiersprache spezifisch für eine Anwendung entwickelt werden oder auf Basis eines

Standardmessdatenerfassungstools arbeiten, welches hierfür konfiguriert wird. In einem späteren Kapitel werden wir uns kurz am Beispiel eines in der Messdatenerfassung/-verarbeitung weit verbreiteten grafischen Programmierertools ansehen, wie solche Applikationen erstellt werden. Wenden wir uns nun den verschiedenen Lösungsstrukturen zu.

Systemlösung mit Einsteckkarte

Es gibt verschiedene Varianten, die Messdatenerfassung vor Ort und die Übertragung der Messdaten in den Computer gerätetechnisch zu implementieren. Die vor allem für Systeme mit kleinerer räumlicher Ausdehnung geeignete klassische Variante zeigt [Bild 3](#). Hier werden Einsteckkarten mit entsprechenden Messfunktionen in einem freien Steckplatz (Slot) des computerinternen Peripheriebussystems installiert. Dies ist nur im Bereich konventionell aufgebauter Desktop- bzw. Industrie-PCs möglich, da andere Computerbauformen wie Laptop, Tablet oder Smartphone über keine entsprechenden Steckplätze verfügen. Im PC-Bereich dominiert als Bus hierzu seit längerer Zeit der PCI-Bus. Dessen Leistungsfähigkeit wuchs im Laufe der Zeit durch Fortschreibung mit neueren Versionen. Auch existieren industrietaugliche Abwandlungen, die auf robustere Bauformen setzen, wie wir noch sehen werden.

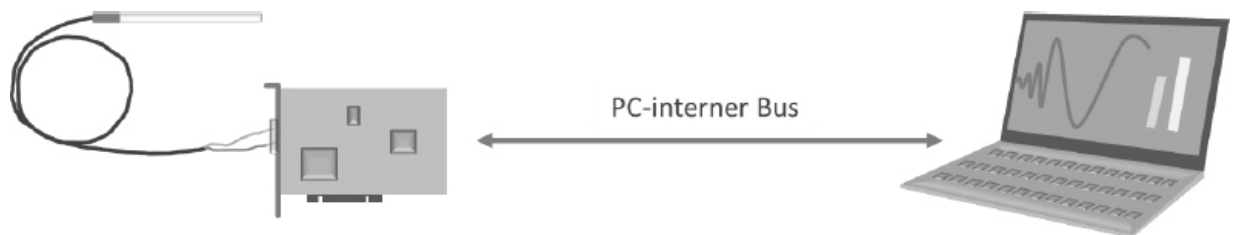


Bild 3: Systemlösung mit Einsteckkarte

Die Systemkomplexität ist bei dieser Systemvariante durch die Anzahl freier Steckplätze begrenzt. Ebenso dürfen die Kabellängen zwischen Messort bzw. Sensor und Einsteckkarte mit ihren analogen elektrischen Signalen nicht zu lange werden; ihre Maximallänge hängt jeweils vom Messverfahren, externen Störeinflüssen (elektrische, magnetische oder elektromagnetische Einstrahlungen auf das Kabel) und der durch die Anwendung vorgegebenen maximal erlaubten Messabweichung ab.

Systemlösung mit externem Modul

Was sich bei Messdatenerfassungssystemen auf Basis konventioneller PCs in letzter Zeit immer mehr beobachten lässt, ist bei Laptop-basierten Systemen schon seit langem Standard, wenn es um räumlich nicht zu weit verteilte Installationen geht: der Aufbau mit einem externen Modul ([Bild 4](#)), das den standardmäßig vorhandenen USB-Anschluss benutzt oder - derzeit eher noch nicht verbreitet - über Ethernet (LAN) bzw. WLAN mit dem Computer kommuniziert.

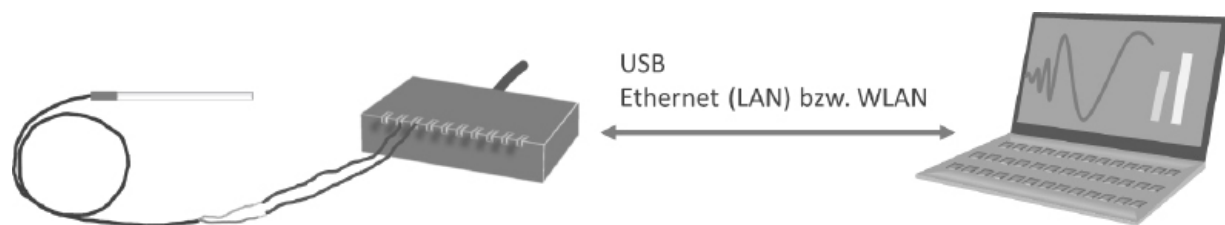


Bild 4: Systemlösung mit externem Modul

Der große Vorteil besteht in einem flexibleren Ausbau, da mehr Module angeschlossen werden können, als üblicherweise Steckplätze in einem konventionellen PC vorhanden sind. Auch müssen keine PC-Gehäuse geöffnet werden.

Systemlösung mit externen Bussen

Insbesondere im rauen Produktionsbereich, wo man häufig automatisierungstechnische Systeme über einen größeren räumlichen Bereich betreiben muss, setzt man auf eine Verkabelung auf Basis der hier eingeführten industriellen Bussysteme, wie wir sie unter den Begriffen Feldbus und Industrial Ethernet noch kennenlernen werden. Aber auch bei umfangreicheren Labortestaufbauten oder Prüfständen, die typische Labormessgeräte in Vernetzung mit einem Computer verwenden, werden entsprechend eingeführte Busse, die sog. Laborbusse, verwendet. Messdatenerfassungslösungen in diesen Umgebungen setzen typischerweise auf die hier jeweils verbreiteten externen Bussysteme als Transportmedium der Messdaten (Bild 5).

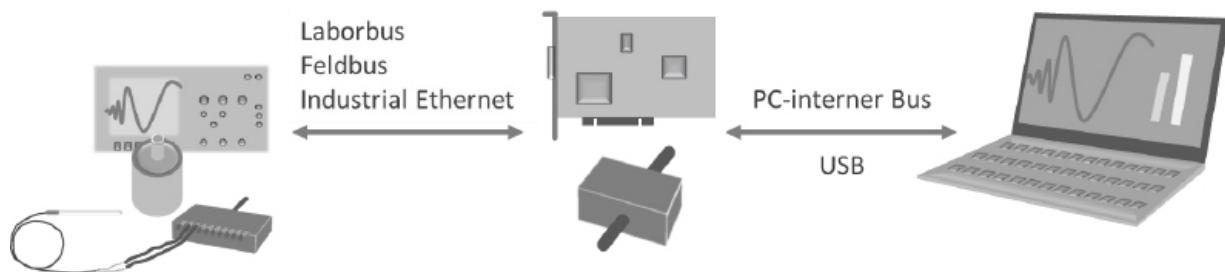


Bild 5: Systemlösung mit externen Bussen

Da Computer üblicherweise nicht über Anschlüsse für diese speziellen Bussysteme verfügen, müssen sie entweder über entsprechende Einsteckkarten oder externe Koppelmodule an die externen Busse angeschaltet werden. Die Anschaltung selbst weist so für sich die Struktur einer der beiden oben betrachteten Lösungsvarianten auf.

Insbesondere Sensoren werden in stark steigendem Maße mit Feldbus- und Industrial Ethernetanschlüssen angeboten, während nur vereinzelte Ausführungen mit USB- oder

konventionellem LAN-Anschluss existieren. Messdatenerfassungslösungen, die insbesondere viele Sensoren beinhalten, bauen deshalb oftmals auf diese Systemlösung.

Messwerte digitalisieren

Wie in [Bild 1](#) gezeigt wurde, ist eine Kernaufgabe bei der Messdatenerfassung die Digitalisierung der Messwerte. Hierzu verfügen die Elektroniken entsprechender Messkomponenten über sog. Analog-Digital-Umsetzer (ADU bzw. engl. Analog Digital Converter, ADC). Dies sind Chips, welche eine analoge Eingangsspannung in ein digitales Datenwort abbilden, dessen Wert als Zahl gelesen die Eingangsspannung repräsentiert. Über die digital arbeitende Kommunikationsschnittstelle werden diese, in entsprechende Datenstrukturen „eingepackt“, an den Computer übertragen ([Bild 6](#)). Zur Messung anderer elektrischer Signale (wie Strom, Widerstand, Kapazität, Induktivität etc.) verfügen entsprechende Messkomponenten über Umformelektroniken, die das betreffende Eingangssignal in eine durch den ADU verarbeitbare Spannung wandeln - in [Bild 1](#) findet dies im Block „Analoge Signalvorverarbeitung“ statt.

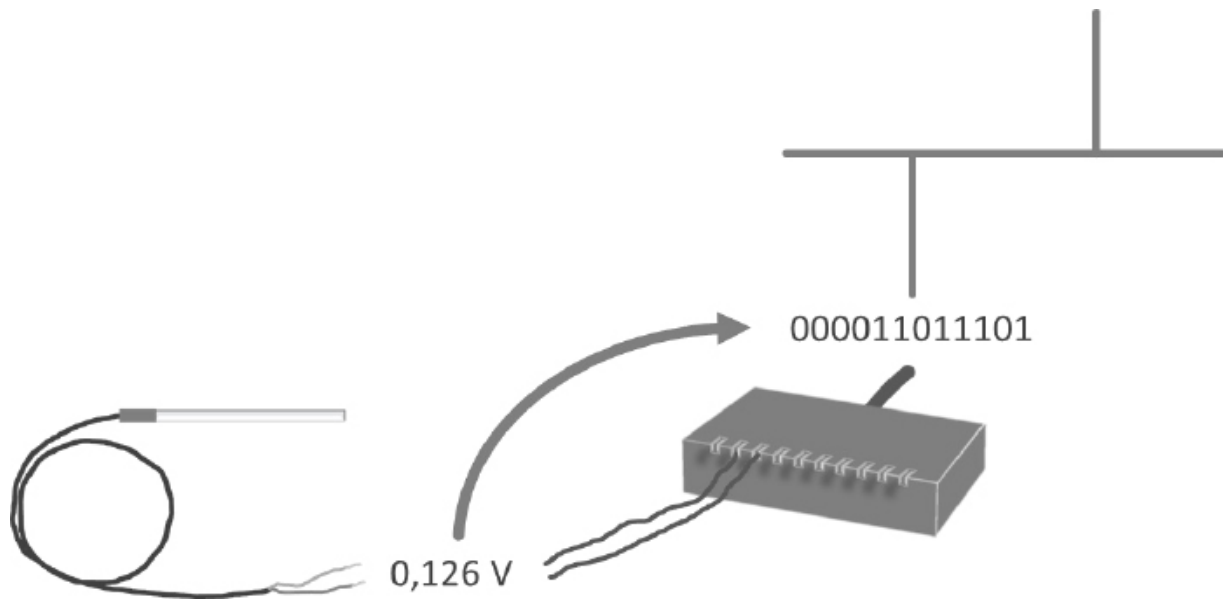


Bild 6: Analog-Digital-Umsetzung bei der Messkomponente

Die Analog-Digital-Umsetzung

Das Grundprinzip eines ADUs zeigt [Bild 7](#) am Beispiel eines durchaus typischen Eingangsspannungsbereichs von 0 bis 10 V und einer sog. ADU-Auflösung von 10 Bits.

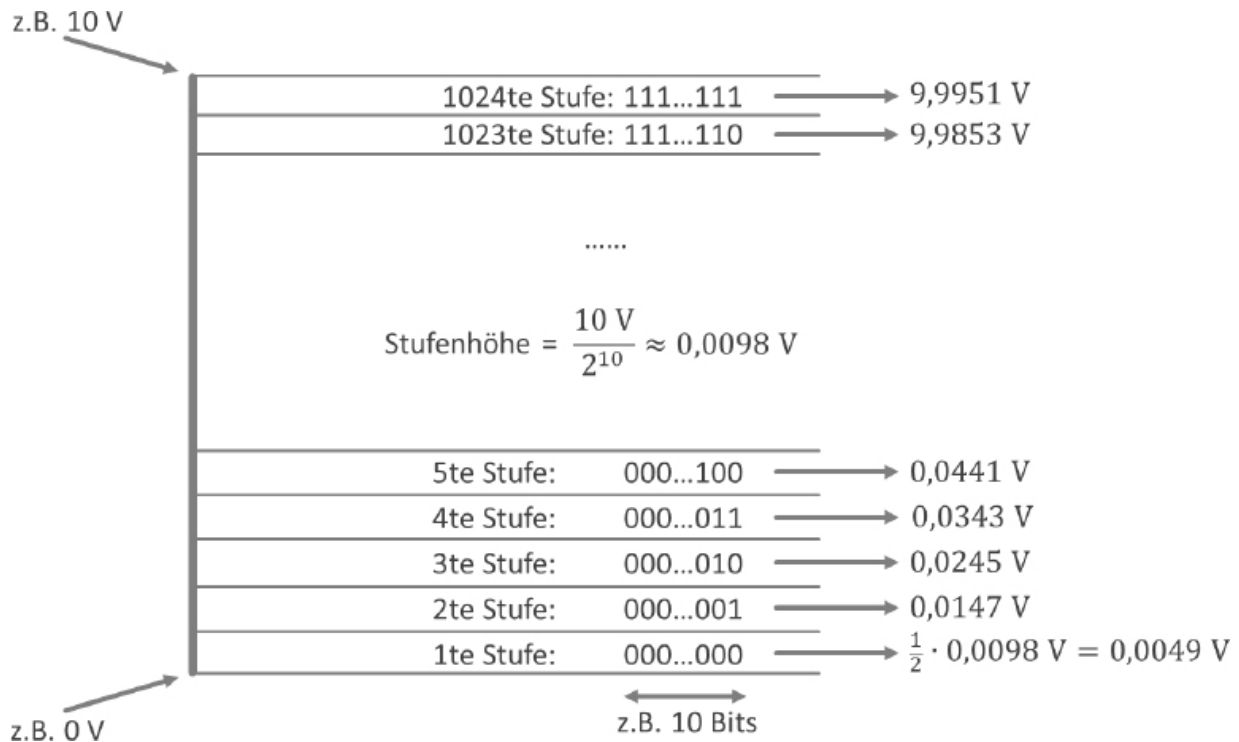


Bild 7: Grundprinzip eines ADUs

Der ADU teilt den gesamten Eingangsspannungsbereich in viele gleich hohe Stufen ein, die mit einem aufsteigenden Zahlenwert nummeriert sind. Der Zahlenwert wird durch eine Binärzahl repräsentiert, die eine der Auflösung entsprechende Anzahl von Bits umfasst. Mit n Bits lassen sich 2^n Stufen darstellen. Im dargestellten Beispiel sind $2^{10} = 1.024$ Stufen möglich, was eine Stufenhöhe von ca. 9,8 mV ergibt.

Diese vom ADU ausgegebene Binärzahl wird von einigen Messkomponenten direkt so über die Kommunikationsschnittstelle übertragen und muss auf Computerseite in eine entsprechende Spannung wieder zurück gerechnet werden. Dies kann in einem gerätespezifischen Treiber erfolgen oder muss durch den Entwickler der Messdaten-Applikation selbst implementiert werden. Entgegen einer weit verbreiteten Praxis sollte

hierbei der kleinsten Binärzahl 000...000, welche die unterste Stufe repräsentiert, nicht der Spannungswert 0 V zugeordnet werden, sondern vielmehr die Hälfte der Stufenhöhe - im Beispiel also ca. 4,9 mV. In analoger Weise werden auch allen weiteren Binärzahlen die der Mitte ihrer jeweiligen Stufe entsprechenden Spannungen zugeordnet. Der Grund hierfür liegt in der Minimierung der sog. Quantisierungsabweichung, wie wir unten noch analysieren werden.

Viele Messkomponenten nehmen diese Rückrechnung bereits selbst vor und übertragen den ermittelten Spannungswert. Unabhängig davon, ob der Spannungswert in der Messkomponente selbst oder erst im Computer ermittelt wird, ist auch er bei genauerer Betrachtung stets quantisiert, da digitale Systeme bekanntermaßen nur mit begrenzter Auflösung Zahlen - in diesem Falle Gleitpunktzahlen - codieren können. Jedoch ist diese Auflösung im Vergleich zur Auflösung bei der Analog-Digital-Umsetzung mit ADUs um viele Größenordnungen höher, so dass dieser Effekt absolut vernachlässigbar ist.

Die sich aus dieser Funktion eines ADUs ergebende Kennlinie ist in [Bild 8](#) dargestellt.

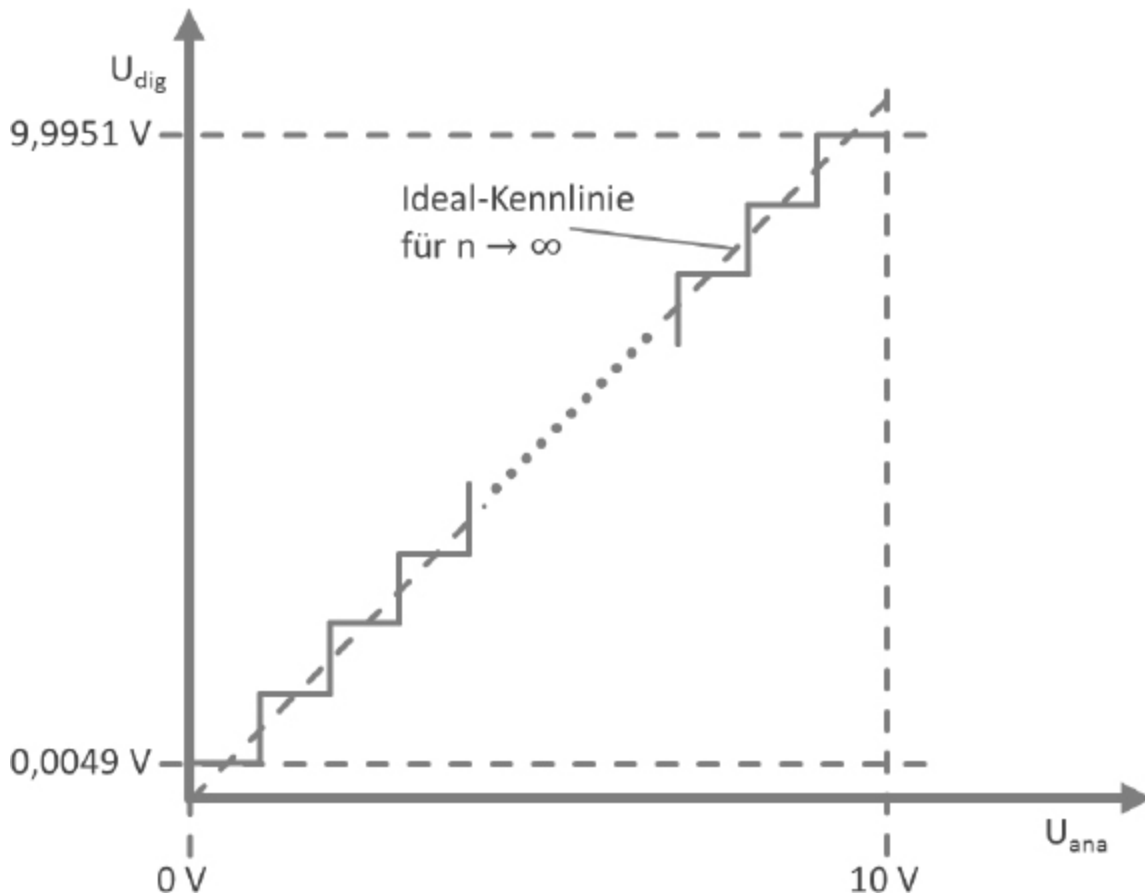


Bild 8: ADU-Kennlinie

Sie ist, von noch zu besprechenden weiteren Umsetzabweichungen abgesehen, eine Treppenkurve, welche sich mit steigender Auflösung n immer mehr der idealen (stetigen) Gerade annähert.

Auflösung, Umsetzzeit und Aufwand

Wir gehen nicht näher auf die interne Elektronik eines ADUs ein. Jedoch sollten wir uns bewusst sein, dass es unterschiedlichste schaltungstechnische Verfahren gibt, diese Analog-Digital-Umsetzung durchzuführen ([Bild 9](#)).

	Auflösung	Umsetzzeit	Aufwand
Direktvergleichende Verfahren:	niedrig	fest, niedrig	hoch
Zählende Verfahren:	hoch	vom Messwert abhängig, im Durchschnitt hoch	niedrig
Sukzessive Approximation:	mittel	fest, niedrig	niedrig
Delta-Sigma:	hoch	vom Messwert abhängig, im Durchschnitt mittel	mittel

Bild 9: ADU-Verfahren

Im Bild sind lediglich vier sehr wichtige Grundverfahren aufgeführt, die wiederum sehr unterschiedlich im Detail ausgeführt sein können. Auch gibt es zahlreiche Kombinationen dieser sowie auch weitere Methoden.

Die Verfahren unterscheiden sich stark in der Auflösung (typ. 8...24 Bits), der Umsetzzeit (typ. 1 ns...100 ms) und dem Aufwand. Unter letzterem ist die Anzahl der schaltungstechnischen Basiselemente auf dem Chip und damit die benötigte Chipfläche zu verstehen, was sich direkt

auf die Herstellkosten auswirkt. Insbesondere Verfahren, die eine geringere Chipfläche benötigen, sind häufig in Mikrocontrollerchips mit integriert. Einfachere Messdatenerfassungshardware verwendet intern häufig diese kostengünstige Variante, während höherwertige Komponenten in aller Regel mit eigenen ADU-Chips höherer Umsetz-Qualität arbeiten.

Quantisierungsabweichung

Mit einer endlichen Auflösung eines ADUs kann die analoge Eingangsspannung stets nur in eine endliche Anzahl von Stufen übergeführt werden. Die Information über den genauen Eingangsspannungswert geht dabei prinzipbedingt verloren. Oder anders formuliert: die zurück gerechnete Spannung ist quantisiert - jede Analog-Digital-Umsetzung geht mit einer gewissen Quantisierungsabweichung einher. Diese entspricht im ungünstigsten Fall betragsmäßig der halben Stufenhöhe, wenn man bei der Rückrechnung wie oben dargestellt jeweils den Spannungswert der Stufenmitte heranzieht. Im Beispiel aus [Bild 7](#) würde jede Eingangsspannung im Bereich 0 V bis knapp unter 9,8 mV zu einer nach Analog-Digital-Umsetzung zurückgerechneten Spannung von stets ca. 4,9 mV führen - die maximal auftretende Abweichung wäre ebenso 4,9 mV. Würden wir bei der Rückrechnung bei einer Zuordnung von 0 V für die unterste Stufe beginnen, so wäre die maximale Abweichung betragsmäßig doppelt so groß, also ca. 9,8 mV.

Allgemein formuliert weist ein ADU mit einem Eingangsspannungsbereich ΔU und einer Auflösung n (in Bits) eine betragsmäßig maximale Quantisierungsabweichung F_{max} von

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta U}{2^n} \quad (1)$$

auf.

Kommen wir noch einmal auf obigen Beispiel-ADU mit $F_{\max} \approx 4,9 \text{ mV}$ zurück. Digitalisieren wir damit eine Eingangsspannung von etwa $4,9 \text{ V}$ - also etwa in der Mitte des Eingangsspannungsbereichs - so entspricht dies einer betragsmäßig maximalen relativen Abweichung von $0,1 \%$, was für viele Anwendungen der Messdatenerfassung vermutlich ausreicht. Anders sieht es aus, wenn wir sehr kleine Spannungen, wie sie beispielsweise viele Sensoren liefern, digitalisieren wollen. So müssen wir bei einer Eingangsspannung von 49 mV bereits mit 10% rechnen und bei $4,9 \text{ mV}$ werden es satte 100% , was sicherlich für keine Anwendung mehr Sinn ergibt.

Daraus ergibt sich eine grundlegende Regel bei der Digitalisierung: sollen bezogen auf den Eingangsspannungsbereich des ADUs kleine Spannungen verarbeitet werden, so verhindert man das Abtauchen in zu große relative Abweichungen, indem man die Eingangsspannung zunächst entsprechend verstärkt. Höherwertigere Messkomponenten für die Messdatenerfassung haben entsprechende Verstärker bereits integriert; ihr Verstärkungsfaktor kann üblicherweise softwaregesteuert eingestellt werden - oftmals in bestimmten Abstufungen z.B. 1-10-100. Mitunter wird statt des Verstärkungsfaktors der mit diesem korrelierende Eingangsspannungsbereich formal umgeschaltet, z.B. 0-100 mV, 0-1 V, etc. Ist die Größenordnung der zu erwartenden Eingangsspannung während einer durch die Messdaten-Applikation gesteuerten Messung nicht bekannt, so empfiehlt es sich, eine erste Messung mit dem kleinsten

Verstärkungsfaktor - entsprechend dem größten Eingangsspannungsbereich - durchzuführen und je nach Größenordnung des Ergebnisses die Messung mit einem passenden kleineren Verstärkungsfaktor zu wiederholen, ggf. auch schrittweise immer passgenauer werdend.

Quantisierungsrauschen

Es gibt etliche Anwendungen in der Messdatenerfassung, bei denen sich die zu digitalisierenden Eingangsspannungen relativ schnell ändern. Denken wir nur an Motorprüfstände, bei denen sich die typischen Messgrößen wie Kompressionsdruck, Brennraumtemperatur, Drehzahl, Zündstrom etc. im schnellen Takt der Kolbenbewegung ändern. Hier wirkt sich die Quantisierungsabweichung eines ADUs als eine Art Rauschsignal aus, das dem ideal ermittelten Nutzsignal überlagert erscheint. Wir wollen hierbei annehmen, dass ein sich änderndes Spannungssignal durch eine dem ADU vorgeschaltete Speicherkomponente in bestimmten Zeitabständen genügend schnell eingelesen und während seiner Analog-Digital-Umsetzung gespeichert wird. Auf damit zusammenhängende Fragestellungen gehen wir unten noch ein.

Konkret hörbar wird dies in akustischen Anwendungen. So könnten wir versuchsweise das mit einem Mikrofon (als Sensor) aufgenommene Akustiksignal direkt oder mit nur geringer Verstärkung digitalisieren, wobei wir bewusst eine niedrige Auflösung (z.B. 8 Bits oder noch niedriger) wählen. Als Akustiksignal möge uns das finale Duett "C'est toi, C'est moi" Carmens mit Don Jose aus der weltberühmten Oper dienen, zum Beispiel in einer Darbietung von Jonas Kaufmann (Tenor) und Kate Aldrich (Sopran), wie sie diese in unvergleichlicher Weise beim Opernfestival Chorégies

d'Orange 2015 gegeben haben. Insbesondere bei den leisen Passagen mit sehr kleinen Spannungssignalen des Mikrofons werden wir dieses Quantisierungsrauschen zwar leise, aber doch kontinuierlich wahrnehmen.

Das mittlere Verhältnis zwischen eigentlichem Nutzsignal und diesem Quantisierungsrauschen kann hierbei als sog. Signal/Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio, *SNR*) angegeben werden. Wie in der Analyse höherfrequenter Signale - insbesondere auch in der Akustik - üblich, verrechnet man hierzu jedoch nicht Spannungen, sondern Leistungen. Genauer gesagt die mittleren Signalleistungen, die umgesetzt würden, wenn man die Spannungen auf einen ohmschen Widerstand wirken ließe - welcher in der Messtechnik derartiger Signale häufig 50 Ω aufweist.

Um verschiedene ADUs bezüglich ihres *SNR* vergleichbar zu machen, verwenden die Hersteller der ADU-Chips als Nutzsignal nun nicht etwa obiges Opernduett, sondern ein Sinussignal, das über den gesamten Eingangsspannungsbereich schwingt mit einer Nulllinie genau in der Mitte. Dessen Effektivwert U_N ist in Abhängigkeit der Amplitude \hat{u} bekanntermaßen

$$U_N = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Die Amplitude \hat{u} umfasst genau die Hälfte des Eingangsspannungsbereichs. Sie ist das Produkt aus der halben durch die Auflösung n gegebenen Stufenanzahl 2^n und der Stufenhöhe βu - nicht zu verwechseln mit dem großen „ U “ des ΔU in (1):

$$\hat{u} = \frac{1}{2} 2^n \Delta u \quad (3)$$