

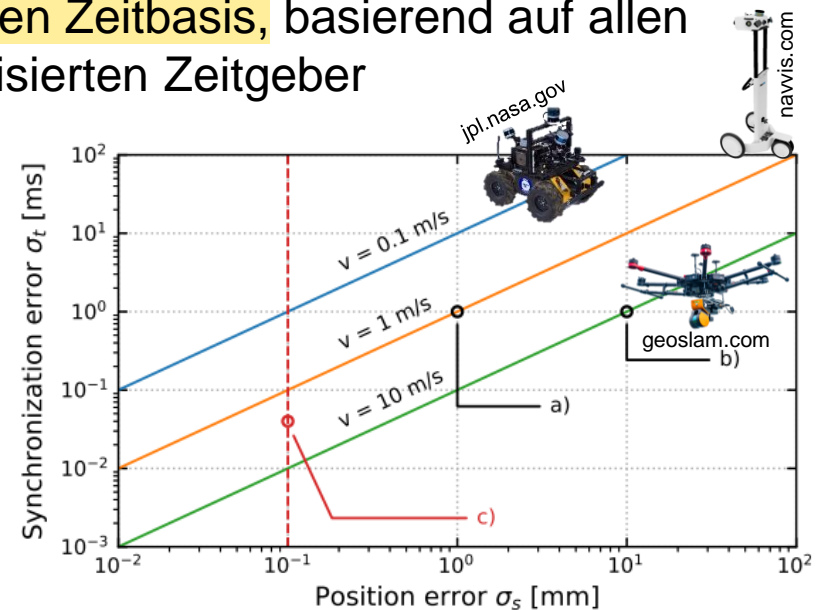
Multi-Sensor-Systeme

Synchronisation

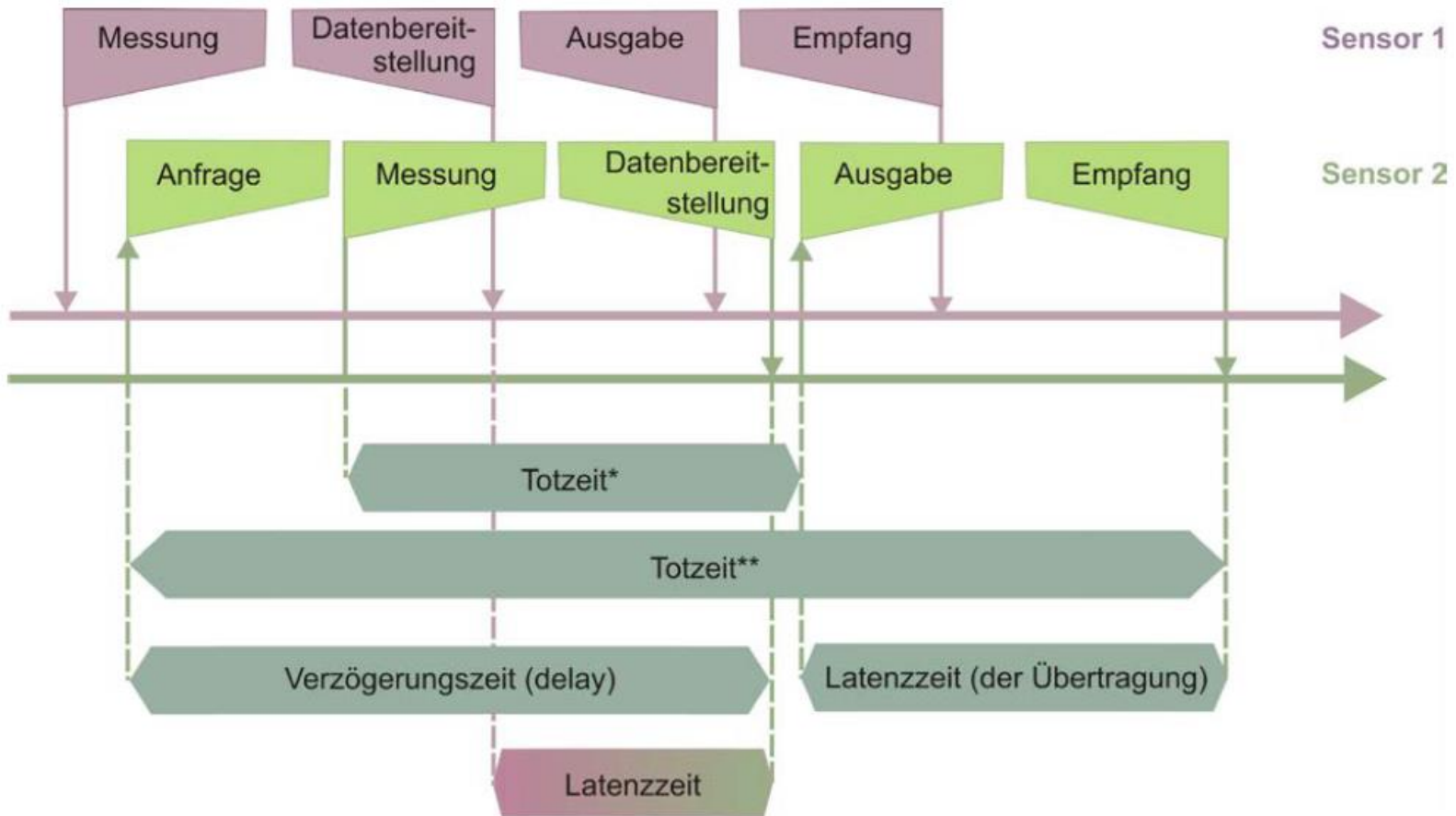
Wintersemester 2022/2023

Dr.-Ing. Sören Vogel

- Korrekte Zuordnung der Messung (unterschiedlicher Sensoren) für die genutzten Aufgaben
 - Angabe des Zeitpunkts, zu dem die Messung durchgeführt wird
- Im Allgemeinen messen die Sensoren die Zeit nicht oder wenn doch, dann 不充足精度 häufig nur mit unzureichender Präzision für kinematische Aufgaben
 - Schaffung einer gemeinsamen stabilen Zeitbasis, basierend auf allen Messungen des MSS über synchronisierten Zeitgeber
 - Verwendung elektronischer Impulse (Trigger- oder Taktsignal)
- Inkorrekte Synchronisation führt zu einem gewissen Zeitoffset Δt
 - Möglicher (Positions-)Fehler hängt u.a. von der Bewegungsform und –geschwindigkeit der Bewegung ab



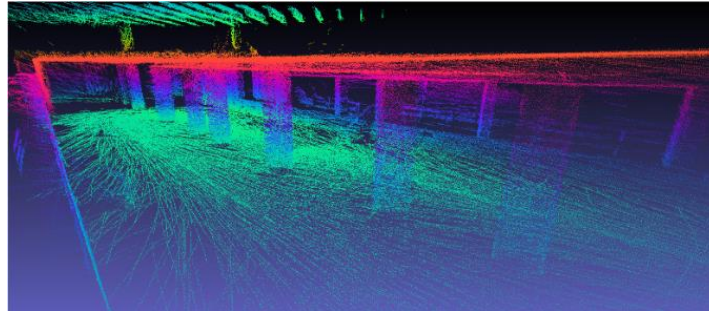
Bedarf an gemeinsamer Zeitbasis / Referenz (2)



Hennes et al. (2014)

Bedarf an gemeinsamer Zeitbasis / Referenz (3)

Auf Basis von SLAM
generierte Punktwolke
einer U-Bahnstation
(Farbe = Höhe)



Voges et al. (2017)

$\Delta t = 24 \text{ ms}$



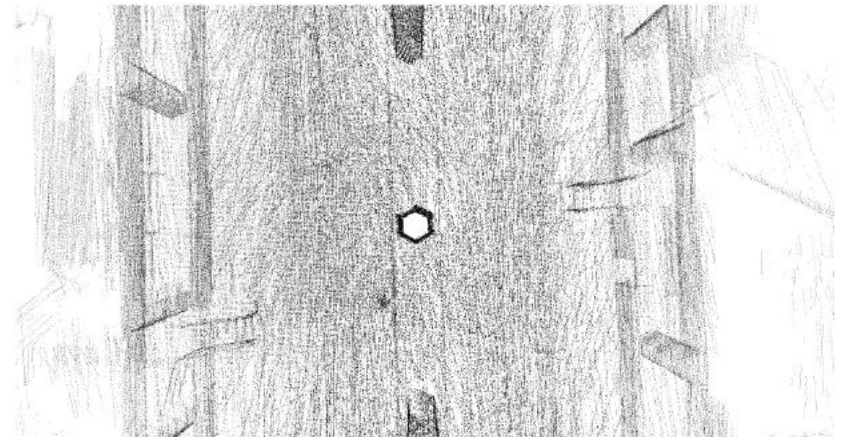
Ungenaue Synchronisierung



$\Delta t = 19 \text{ ms}$



Genauere Synchronisierung



- Hochpräzise primäre zivile Zeitquelle mittels eines stabilen ^{振動器} Oszillators (Atomuhr) als internationaler Standard
- Realisierung durch Vergleich von mehr als 400 Atomuhren auf der Welt
- Basiert auf der Internationalen Atomzeit (TAI) mit einem anfänglichen Offset von 10s im Jahr 1972
- Keine Anpassung an lokale Zeitzonen, daher driftet sie leicht von der auf der Erdrotation basierenden Zeitreferenz ab (Sonnenzeitstandard)
 - gelegentliche Einführung von Schaltsekunden zur Korrektur der Abweichung zwischen UTC und Sonnenzeit
 - weicht von TAI ab (aktuell 37s Rückstand auf TAI (2022))

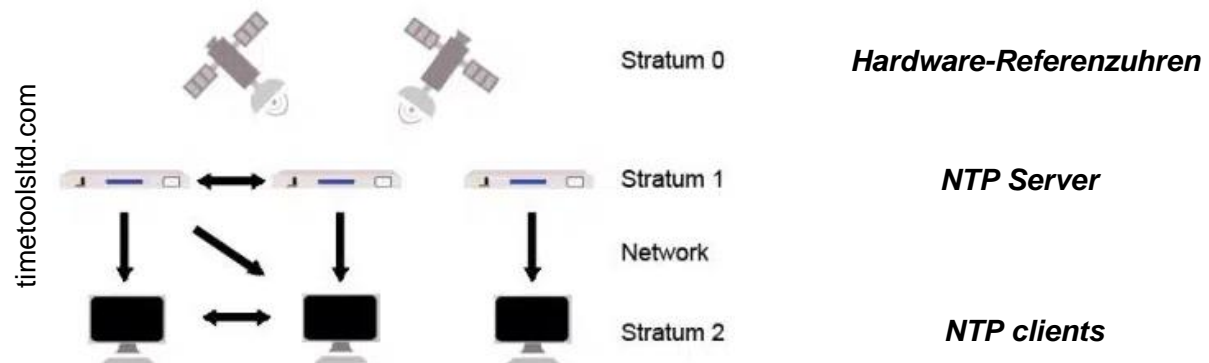


ptb.de



ptb.de

- Standard-Internetprotokoll zur Synchronisierung von Computeruhren in einem Netzwerk mit UTC über Client-Server-Struktur
- Zeitstempel-Paket (NTP-Zeit) enthält *Start-*, *Empfangs-*, *Sende-* und *Zielzeitstempel* zur Berechnung der Netzausbreitungsverzögerungen
- NTP-Clients können eine Genauigkeit von <1 ms haben, aber asymmetrisches Routing, Bufferbloat, Jitter (aufgrund von Ausbreitungsverzögerungen durch Kabelnetze) führen zu 25 - 100 ms Abweichungen oder sogar noch mehr
- Unterschiedliche öffentliche Zeitserver (NTP-Hosts) in Bezug auf bestimmte hierarchische Ebenen (aka "Stratum,,")

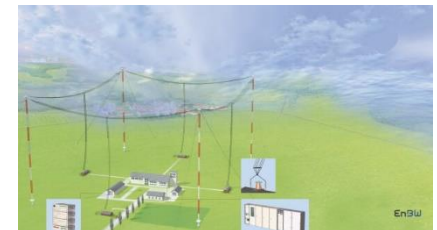


- Zeitübertragung über Internet:
 - Übertragung von Zeitimpulsen PTB-Server mittels des **Network Time Protocol (NTP)**:
 - Zeitverzögerung durch die Übertragung:
 - bis zu 25 ms
 - Zusätzlich auch weitere Protokolle hinsichtlich Präzision, Energieeffizienz, Skalierbarkeit, “Ad-hoc”-Anwendbarkeit:
 - Precise Time Protocol (PTP), Referenc Broadcast Synchronisation (RBS), Timing-Sync Protocol for Sensor Networks (TSPN)

- Zeitübertragung über Funkverbindung (Langwelle): **DCF77**
 - Ausstrahlung eines kodierten Signals mit hoher Sendeleistung
 - Genauigkeit des übertragenen Signals:
 - 5 – 150 ms in Abhängigkeit der Antenne, Signalfilter, Wettereinfluss etc.
 - In der Industrie:
 - Breitband-Antennen und -Empfänger → 5 – 15 ms



ptb.de

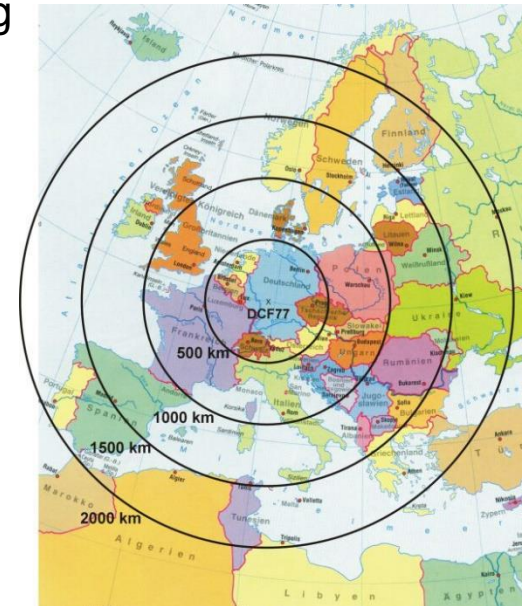


[EnBW]

Übertragungsfehler bei der Zeitübertragung (1)

Auswirkungen auf das DCF-Signal

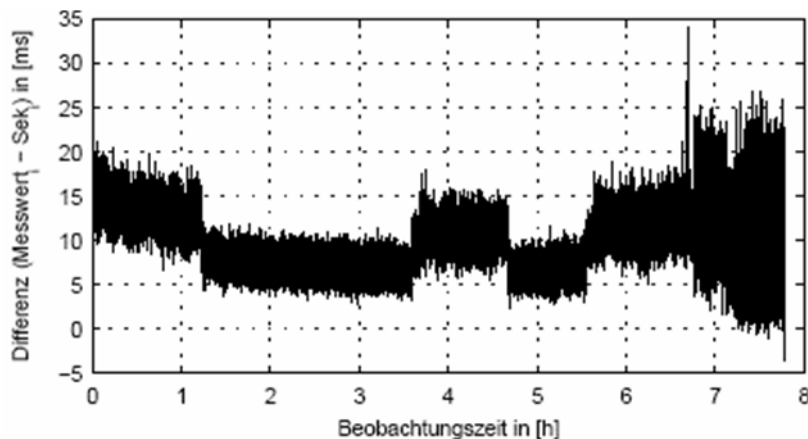
- Übertragungsfehler zwischen Sender und Empfänger beim Empfang von
 - Bodenwelle entlang Erdoberfläche → konstanten Offset berechnen
 - Raumwelle nach Reflexion an ionosphärischen Schicht → Zeitschwankungen aufgrund von Höenschwankungen der **Ionosphäre** 电离层
- Überlagerung von Boden- und Raumwellen in einer Entfernung vom Sender von etwa 600 km - 1100 km (Abhängigkeit vom Tag und der Uhrzeit)
 - Reichweite insgesamt bis zu 2100 km
- Dabei gilt: Zeitschwankungen in der Größenordnung von wenigen ms
- Zusätzliche Auswirkungen aufgrund von
 - Refraktion (Zeitverzögerung)
 - Temperaturschwankungen
 - Stürme, etc.



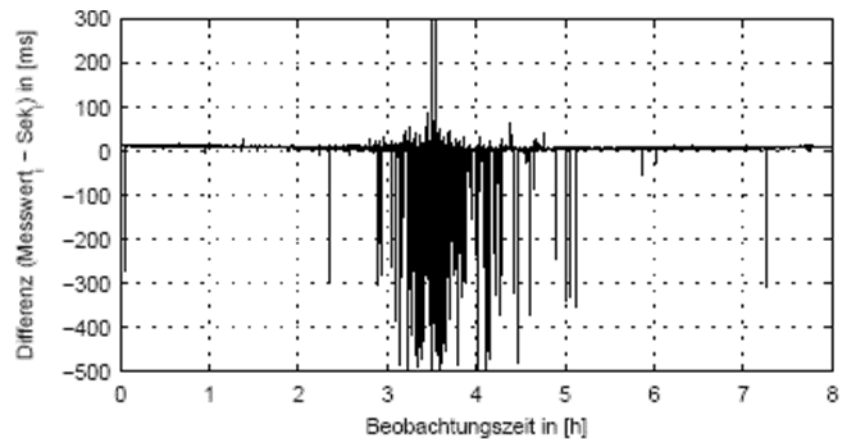
ptb.de

- Vorteil der Langwellenübertragung: Verfügbarkeit in Gebäuden oder abgeschirmten Bereichen
- Mit einer einfachen und kostengünstigen DCF77-Ausrüstung kann eine Zeitreferenz mit einer Stabilität von 1 ms **nicht** erreicht werden

Rauschen des DCF-Signals @~350 km

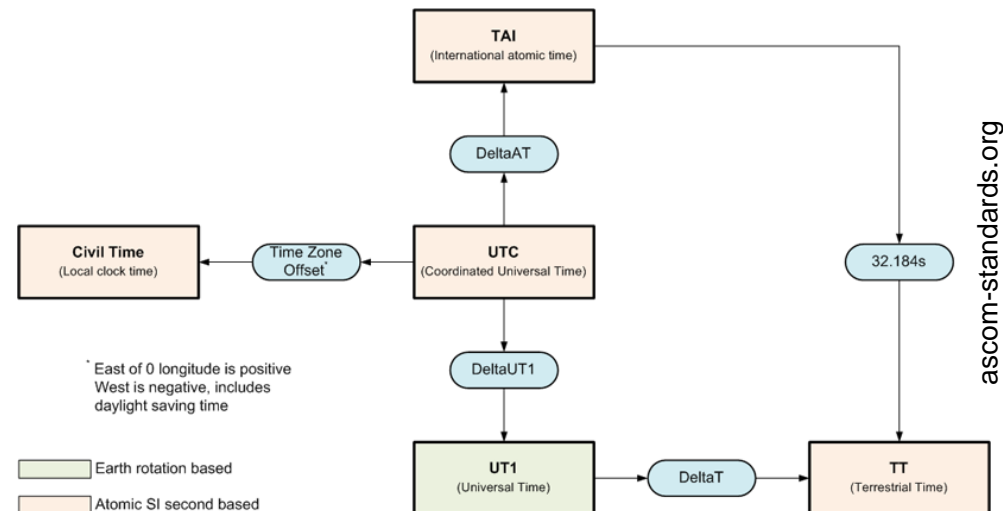
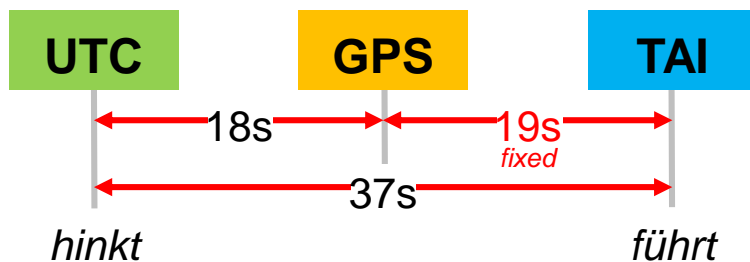


Auswirkungen von Gewittern auf das DCF-Signal



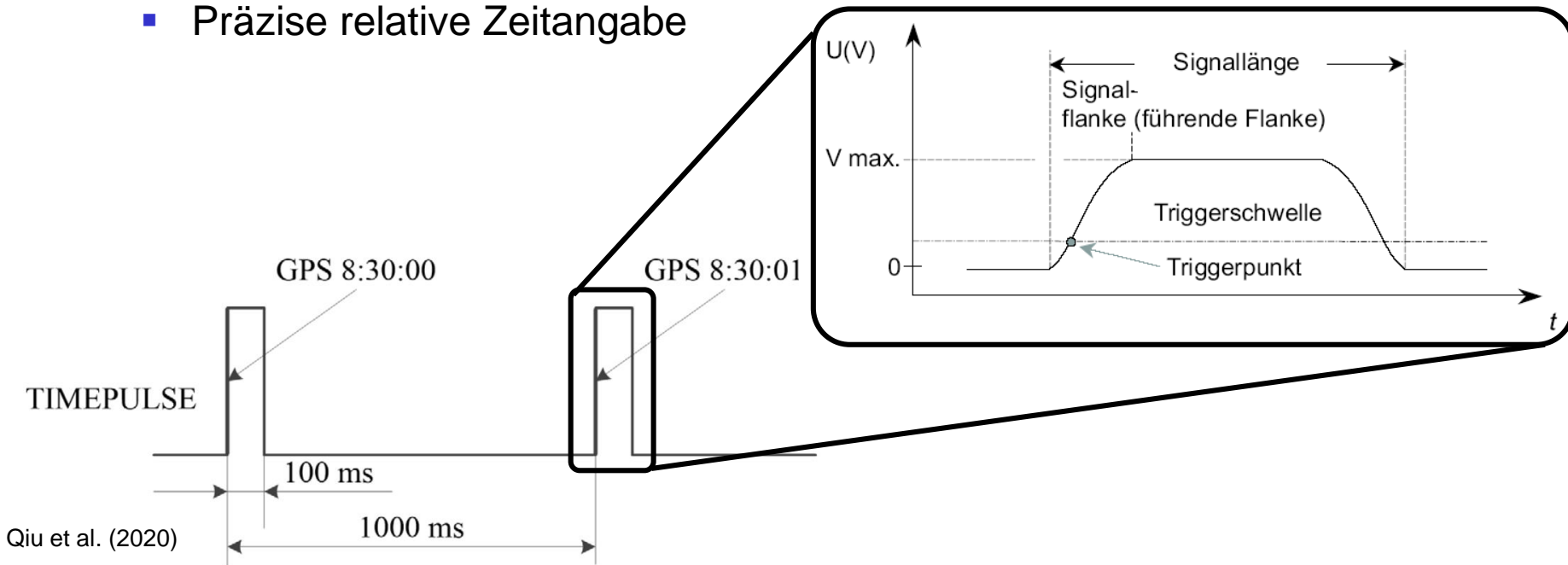
Stempfhuber (2004)

- Wird durch präzise Atomuhren ($\pm 50\text{ns}$) von Satelliten und Bodenkontrollstationen des globalen Positionierungssystems (GPS) realisiert
- Konstanter Versatz zu TAI: $\text{TAI} - \text{GPS} = 19\text{s}$
- Anzahl der Wochen, Sekunden der aktuellen Woche, seit der Startepoche
- 00:00:00 UTC (00:00:19 TAI) am 06. Januar 1980
- **Keine Berücksichtigung von Schaltsekunden** → weicht von UTC ab (aktuell 18s vor UTC (Stand: 2022))



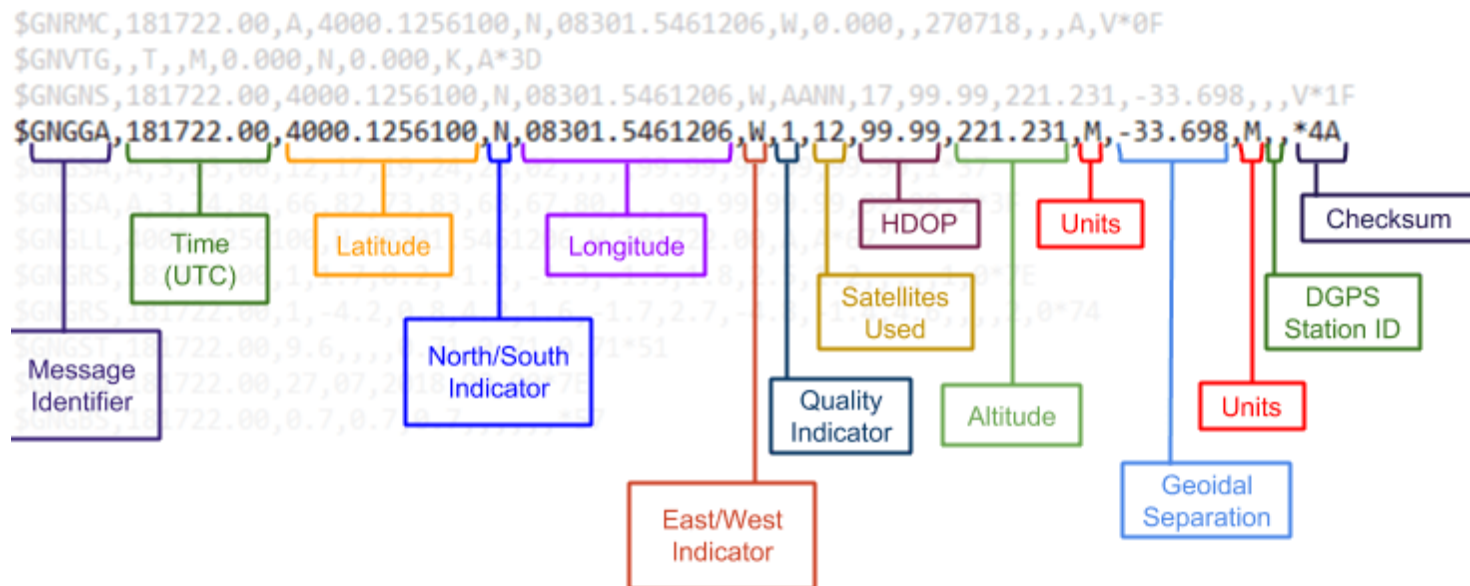
1. Pulse-per-second (PPS)

- Genaues Rechteckimpulssignal $\pm 5\mu\text{s}$ für den Start für jede UTC-Sekunde
- Die ansteigende Flanke des Hochpegels definiert den genauen Zeitpunkt der PPS-Ausgabe
- Weicht bei GPS-Empfängern um $\pm 50\text{ns}$ von der UTC-Sekunde ab
- Präzise relative Zeitangabe



2. National Marine Electronics Association (NMEA) Nachricht

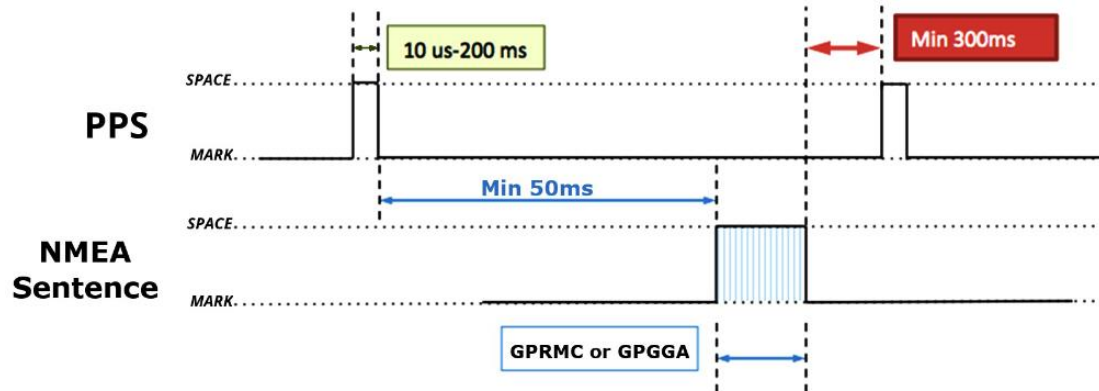
- GPS-Schnittstellenprotokoll
- Positions- und absolute Zeitinformation etwa in der Mitte von zwei benachbarten PPS-Signalen
- Nicht genau genug für eine Zeitreferenz; Verzögerungen innerhalb eines Sekundenintervalls möglich



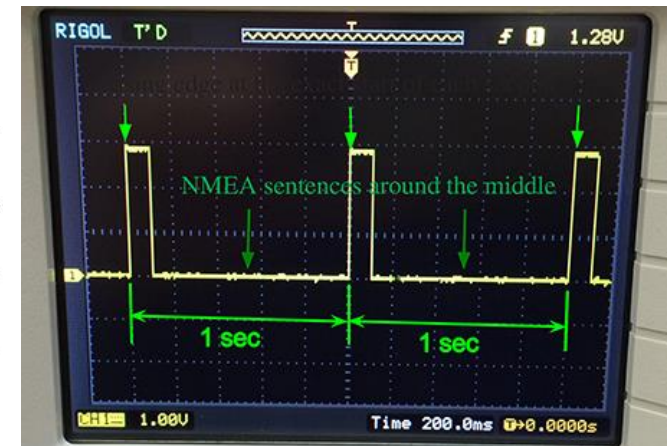
branddowns.com

Genaue absolute Zeitangabe durch Kombination von

1. Präzisen PPS und
2. Absoluter NMEA-Satz



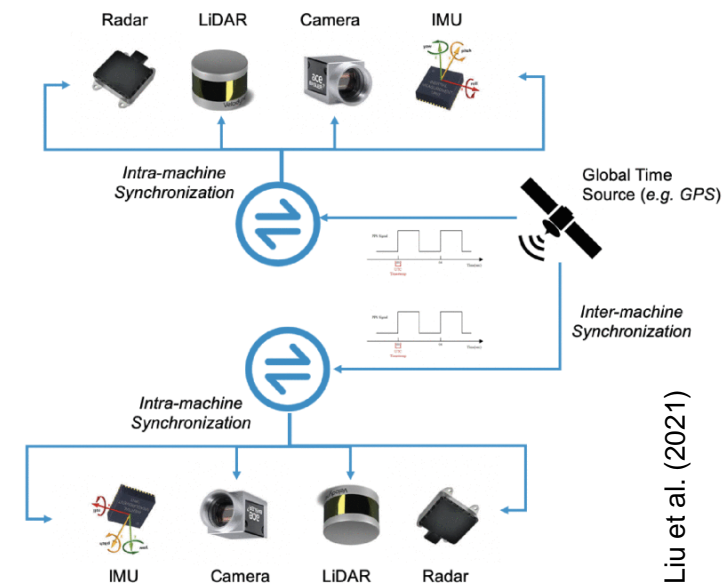
velodynelidar.com



Koo et al. (2019)

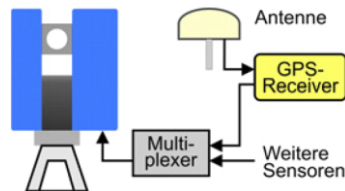
- Die Ausgabe der GPS-Zeit ist abhängig von der Verfügbarkeit einer Empfängerposition
 - Min. 4 Satelliten sind erforderlich, um den Fehler der Empfängeruhr zusätzlich zu den 3 Koordinaten zu schätzen
- Korrektur des Satellitenuhrfehlers auf der Grundlage der Ephemeridendaten
 - Zeitliche Unsicherheit in der Größenordnung von 10^{-8} s (\rightarrow 10 ns)
 - Low-Cost: 10^{-6} s (\rightarrow 1 μ s)
 - Länge des Antennenkabels führt zu Offset
 - ~2ns für jeden 1m

→ Hervorragende Zeitreferenz für die meisten kinematischen Anwendungen



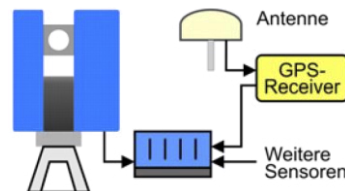
Liu et al. (2021)

a) Integration von externen Sensorsignalen in den Datenstrom des Laserscanners



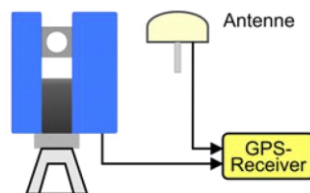
- Mehr als ein Sensor → Multiplexer
- Beschränkt auf die Erfassung digitaler Signale

b) Echtzeit-Rechner



- Flexibelste Lösung (Sensoren, Signale)
- Erfordert Softwareentwicklung
- i.d.R. kostspieliger

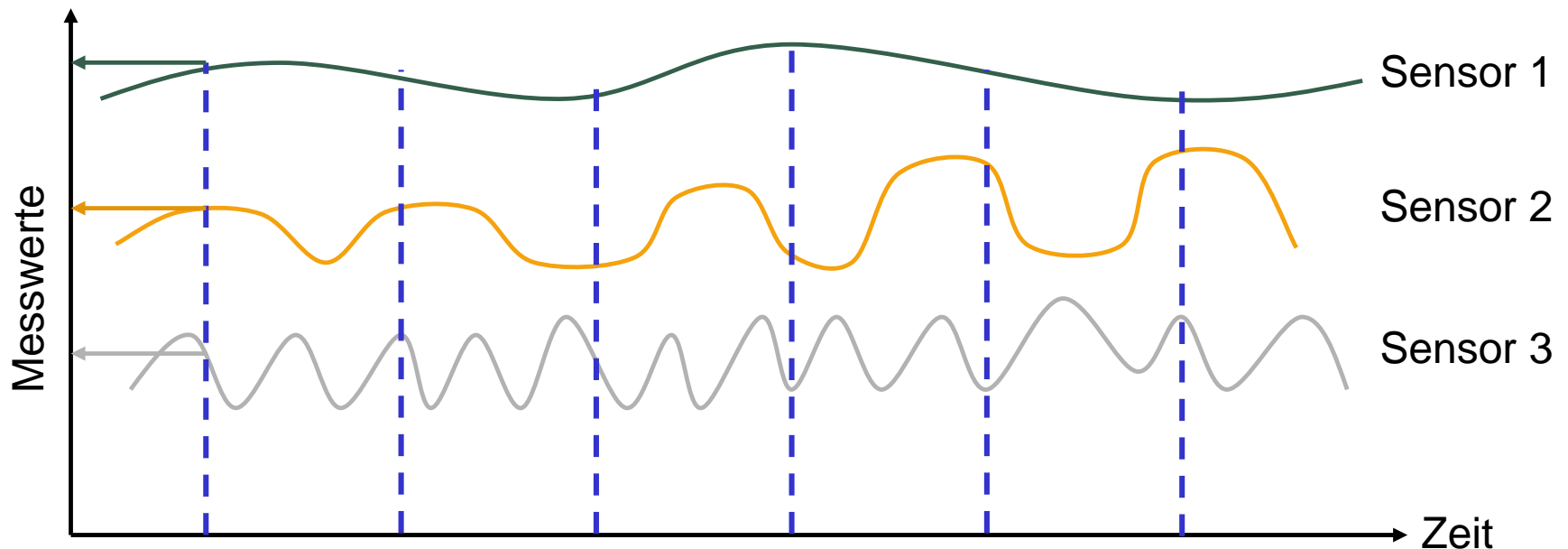
c) Trigger-basiert: GNSS-Empfänger | Lasertracker



- Normalerweise keine zusätzliche Hardware
- GPS-Events (Verfügbarkeit des UTC-Zeitstempels)

Hesse (2007)

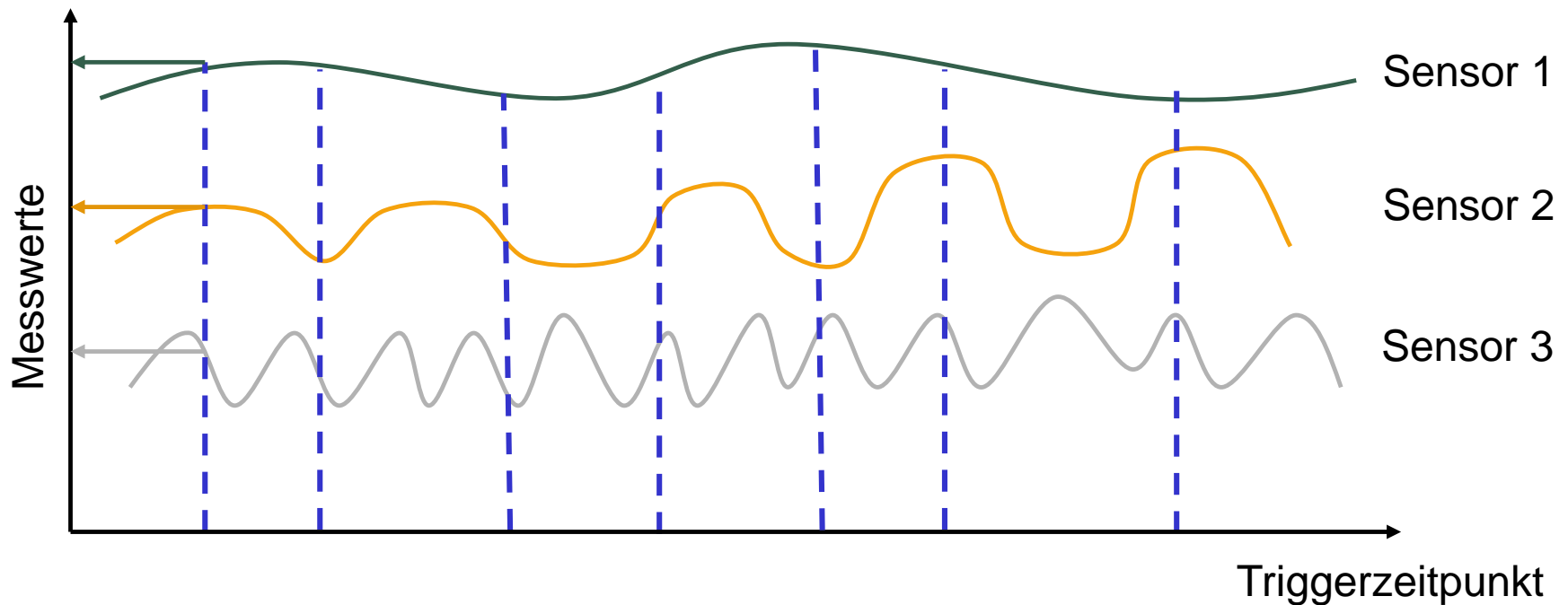
- Zentrale Uhr für alle Sensoren, die den Beginn der Messungen steuert



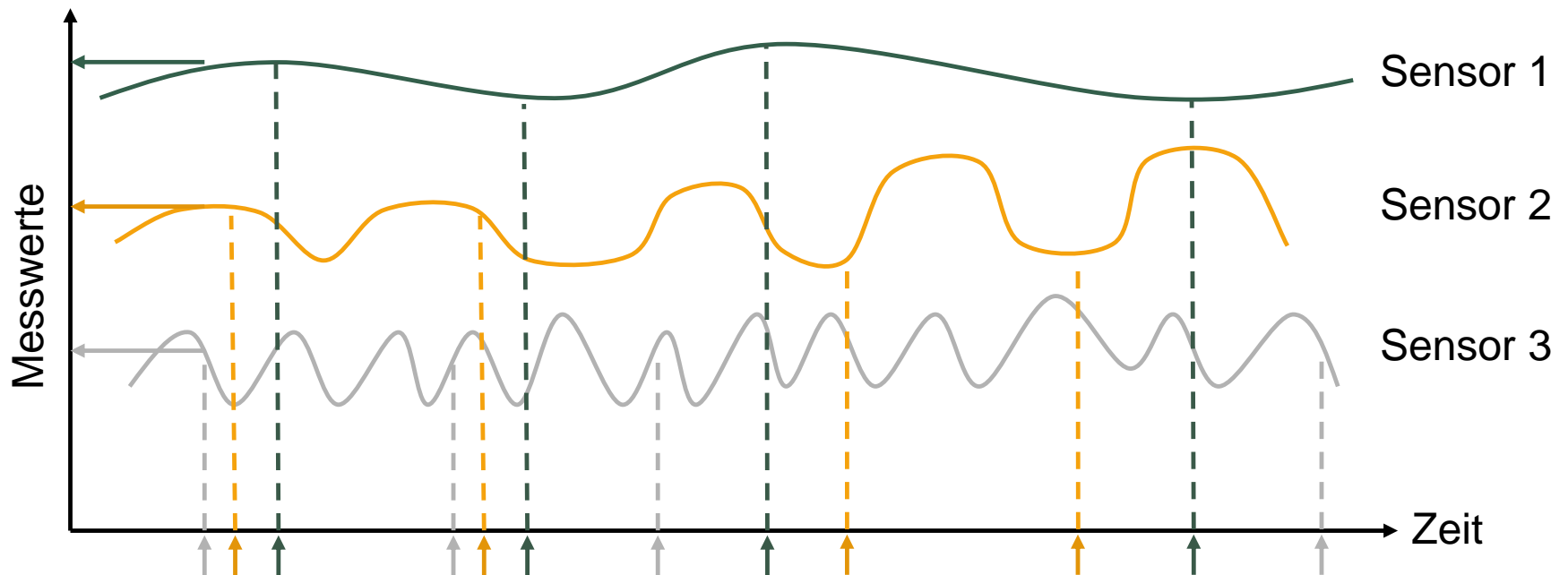
- **Vorteile:**
 - Die Messungen haben eine Zeitreferenz mit äquidistanten Intervallen, was für die nachfolgende Verarbeitung von Vorteil ist
- **Nachteile:**
 - Eigenschaften der Sensoren, wie z.B. die Ansprechzeit, werden nicht berücksichtigt (gleiches Abtastintervall für alle Sensoren)
 - Inertialsensoren: Informationen können verloren gehen
 - Dynamische Sensoren: Datenflut
 - Unterschiedliche Signalmuster nicht berücksichtigt
 - zum Beispiel die Form der Flanken der Pulse
 - Technisch kostenintensiv 费用高的

- Nachteile (Fortsetzung):
 - Unterschiedliche Totzeiten der Sensoren
 - Wie lange dauert es
 - Sich mit dem Sensor zu verbinden
 - den Messwert im Sensor zu erzeugen
 - die Messung zur Verfügung zu stellen
 - Das Taktsignal muss alle Sensoren des MSS gleichzeitig erreichen (möglicherweise verschiedene Kommunikationskanäle)

- Ähnlich wie die taktgesteuerte Registrierung mit dem Unterschied, dass die Erzeugung des **Triggersignals** durch ein Ereignis verursacht wird
触发信号



- Jeder Sensor wird mit einer eigenen Aufzeichnungsrate betrieben
- ➔ Voraussetzung: Referenzierung der Zeitbasis des Sensors auf eine zentrale MSS-Zeitreferenz (z.B. per GPS-Zeit)



- Vorteile:
 - Unabhängig funktionierende Module → Flexibilität
 - Reduzieren der Datenmenge
- Nachteile:
 - Kombinieren verschiedener Zeitbasen
 - Interpolation in äquidistanten Zeitintervallen

- Anmeldezeitraum für mündliche Prüfung per QIS gestartet:
15.11. bis 30.11.2022

- Keine Vorlesung am kommenden Mittwoch (23.11.2022)