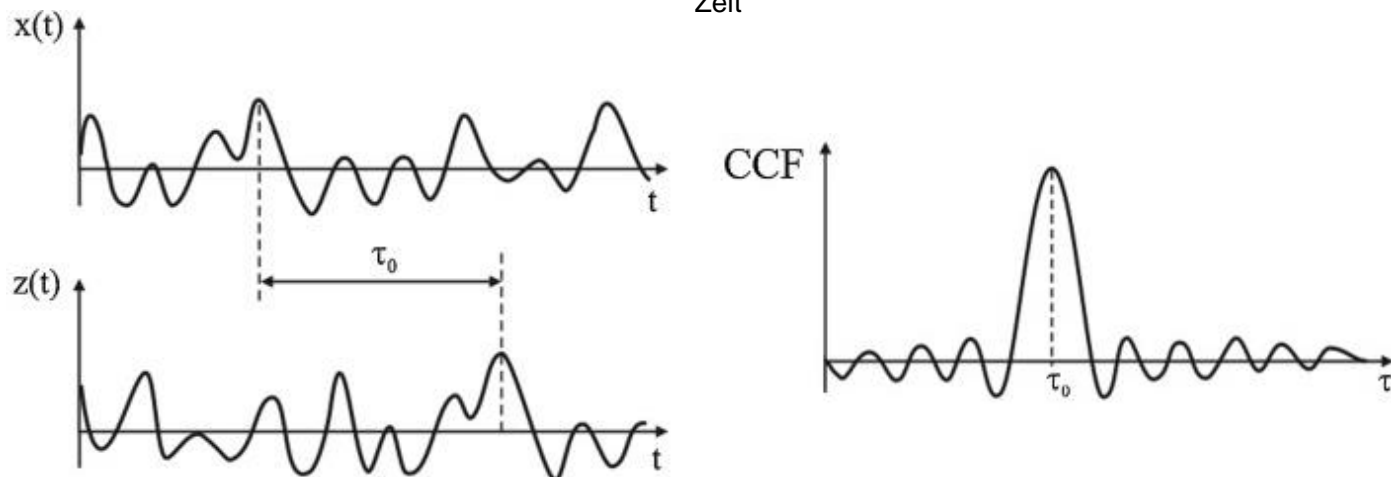
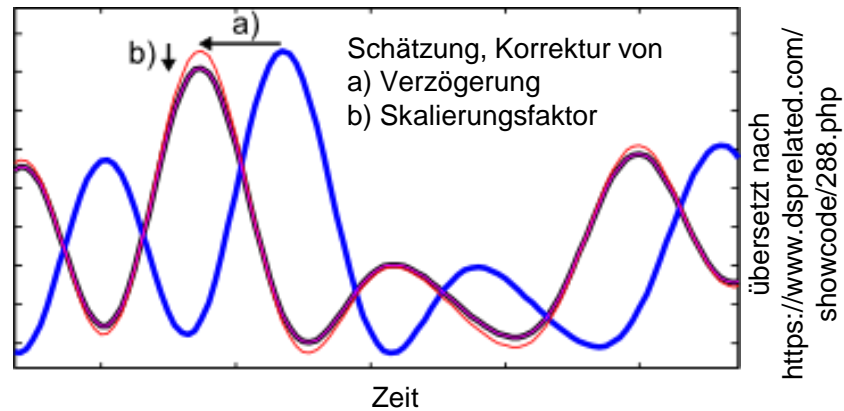


- Anwendung der **Kreuzkorrelationsmethode** 交叉相关法



Hanus (2019)

- Messungen sollten ohne allzu große Verzögerung registriert werden, um eine hohe Qualität der Positions- und Objektinformationen zu gewährleisten
 - Notwendigkeit von Echtzeitsystemen:
 - **Erfassen und Verarbeiten von Daten innerhalb einer vordefinierten und reproduzierbaren Zeittoleranz**
- Zeitliche Beschränkungen ergeben sich aus einzuhaltenden Fristen (basierend auf den Erfassungs- und Kontrollaufgaben)
 - Zeitspanne zwischen dem Auftreten eines Ereignisses und einer definierten Systemreaktion
 - Reaktion innerhalb weniger Millisekunden für ein autonomes Fahrzeug
 - Reaktion innerhalb von Sekunden/Minuten/Stunden für ein Überwachungssystem
- Zitate aus Hennes et al. (2014):
 - *"Echtzeit ist die Zeitspanne, die, wenn sie nicht überschritten wird, den Eintritt einer Katastrophe verhindert."*
 - *"Die Echtzeit hängt in erster Linie von der Aufgabe und indirekt von der Funktionsweise des MSS ab."*

- In einem MSS werden zeitkritische Aufgaben ausgeführt
- Beispiel:
 - Übertragung des Triggersignals an die Sensorkomponenten
 - Messstart nach Systemanforderung
- **Voraussetzung:**
 - Das System sollte so schnell arbeiten, dass keine Störungen bei der Durchführung der nachfolgenden Aufgaben auftreten
- Konzept der **Echtzeit:**
 - Erledigung einer bestimmten Aufgabe innerhalb einer bestimmten Zeit

Punctuality / Pünktlichkeit

- Die Reaktion auf ein Ereignis muss innerhalb einer oder mehrerer fester Fristen eingeleitet oder abgeschlossen werden
 - Soft: Geringfügige Überschreitung der Zeitbedingung oft akzeptabel
 - Firm: Eine Überschreitung des Limits kann akzeptiert werden, aber die Daten werden unbrauchbar
 - Hard: Die Zeitvorgaben müssen eingehalten werden, da sonst unumkehrbare Folgen eintreten

Simultaneity / Gleichzeitigkeit

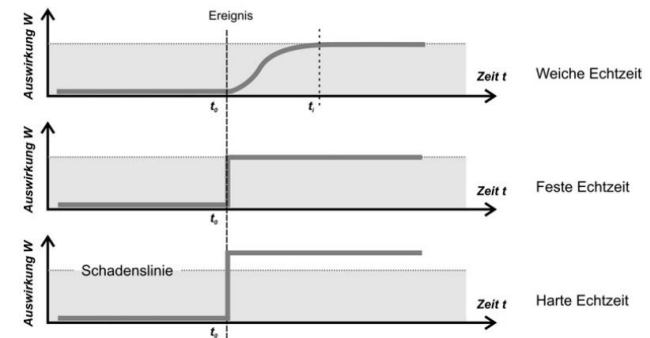
- Parallele Ausführung von Aufgaben (von mehreren Sensoren) ohne signifikante Erhöhung der Latenzzeit

Availability / Verfügbarkeit

- Ständige Betriebsbereitschaft/Standby (auch in Bezug auf andere Aufgaben des Betriebssystems)

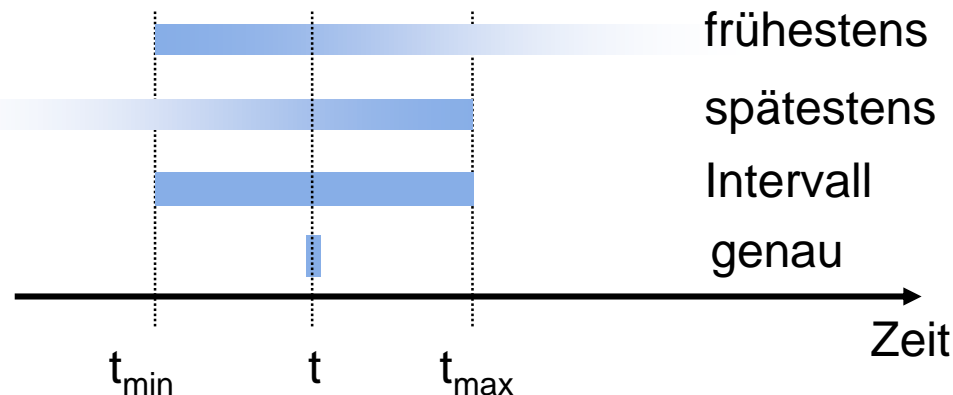
Determinacy / Determiniertheit

- Funktionale Vorhersagbarkeit einer Ausgabe und die Fähigkeit, Reaktions- und Latenzzeiten vorherzusagen



Hesse (2007)

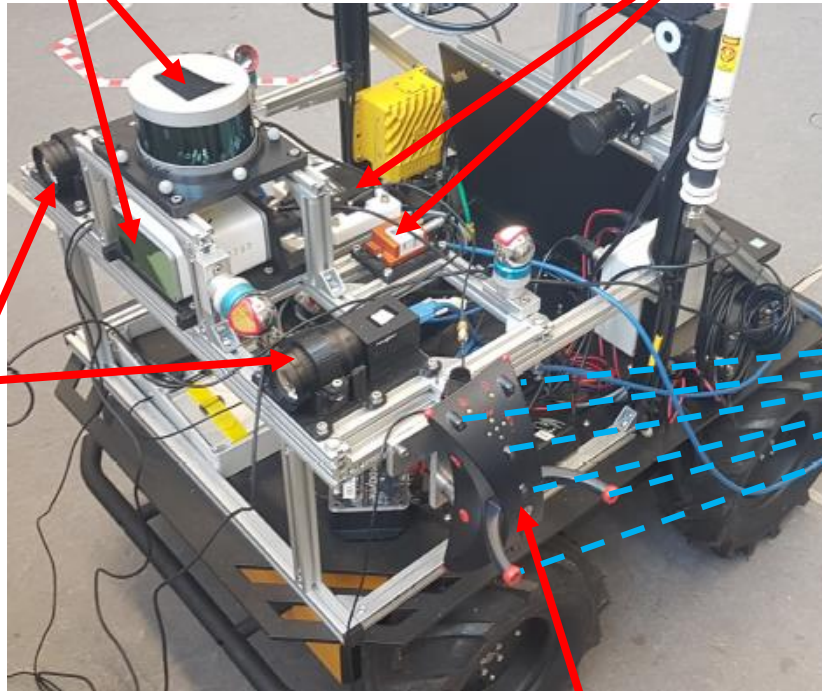
- **Zeitlicher Rahmen**
 - i.e. die Rechtzeitigkeit des Systems
 - beschrieben durch Zeitanforderungen mit Hilfe vom/n
 - frühestmöglichem Zeitpunkt
 - spätestmöglichem Zeitpunkt
 - einem Zeitintervall 时间区间
 - einem genauen Moment



Laserscanner

IMU

RGB-Kameras



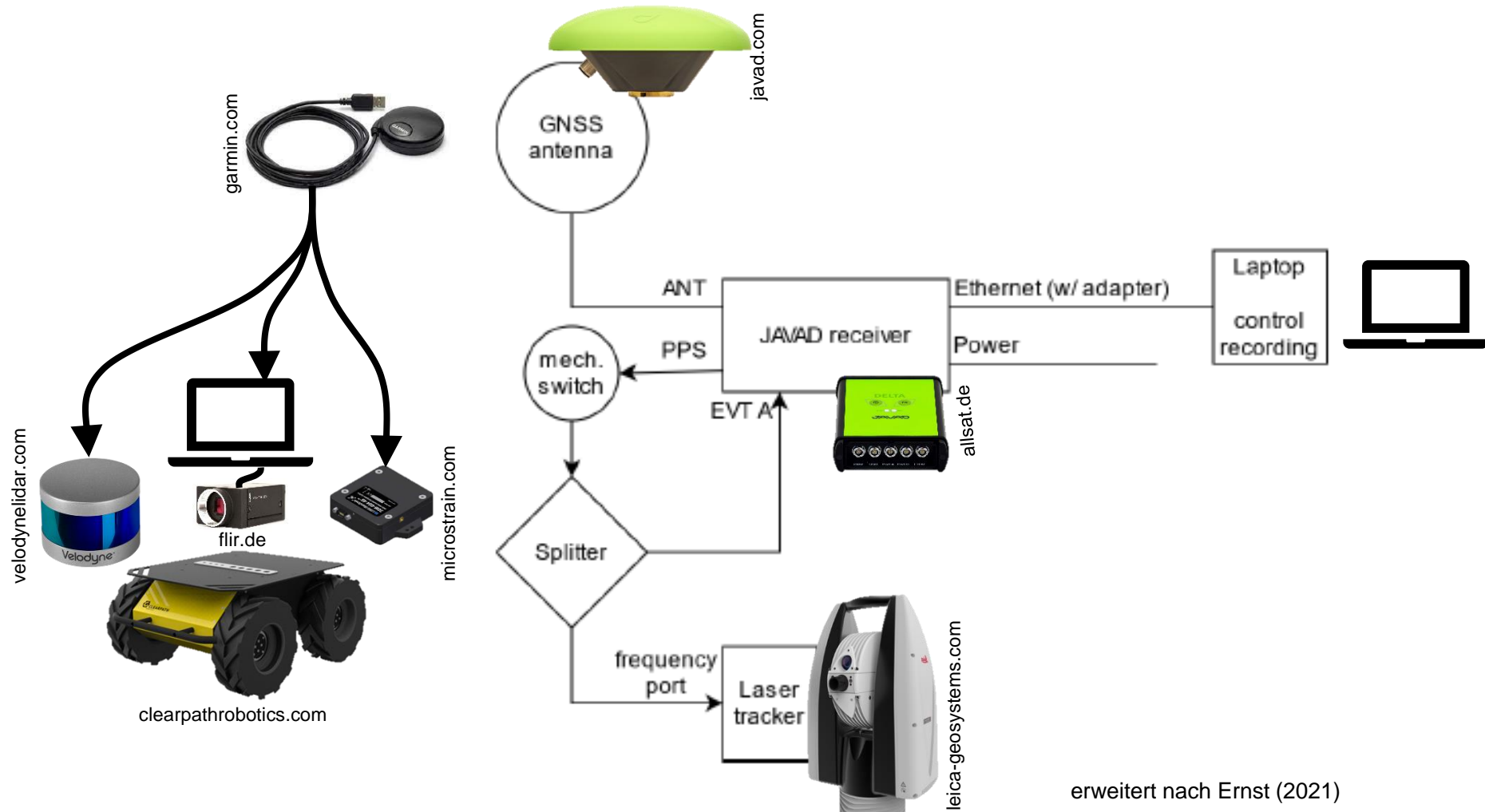
[Ernst, 2021]

T-Probe



leica-geosystems.com

Beispiel: Synchronisation kTLS-basierter HUSKY



erweitert nach Ernst (2021)

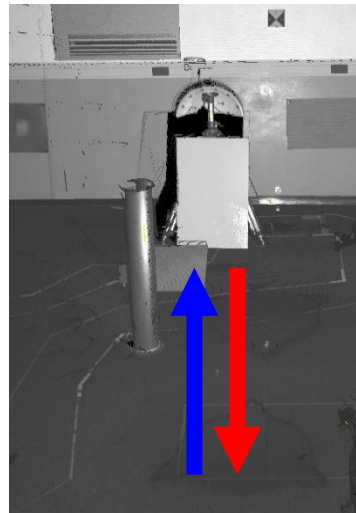
- Qualität hängt von möglichen Delays ab

Delay [s] / Einfluss auf Position [m]		Mögliche Ursache
bei Bewegungs- geschwindigkeit von 1 m/s	$20 \cdot 10^{-9}$	Angenommener Hardware Delay vom LT
	$150 \cdot 10^{-9}$	Länge des Kabels
	$1 \cdot 10^{-3}$	Unsicherheit der ansteigenden GPS-Flanke (Garmin 18x für Velodyne Puck)
	$20 \cdot 10^{-3}$	Synchronisationsfehler zwischen Empfänger und LT (bei 50 Hz)
$\sim 20 \cdot 10^{-3}$		Summe der Einflüsse (worst case)
$1,0002 \cdot 10^{-3}$		Summe der regulären Einflüsse

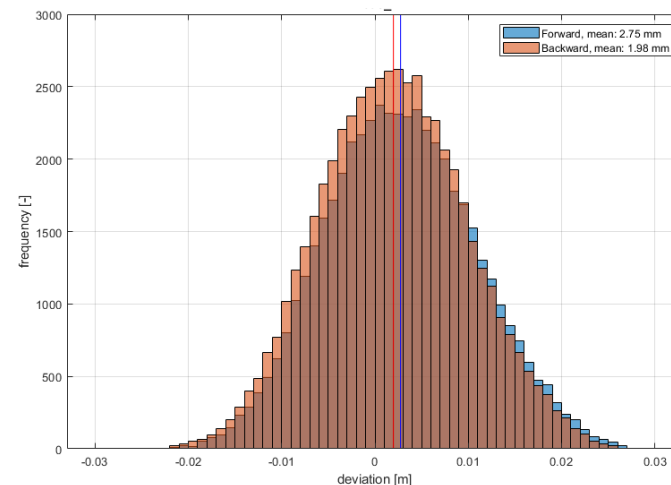
Einfluss für Antennenkabel mit 30 m $\rightarrow t_{\text{delay}} = \frac{30 \text{ m}}{2 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 150 \text{ ns}$

Ernst (2021)

- Analyse eines möglichen Delays anhand kinematischer Messungen
 - Überprüfen einer Abweichung während Vorwärts- und Rückwärtsfahrt auf Systematik mittels Referenzpunktvolke
 - Abstand (aus kinematischer Punktwolke) zu einem Referenzobjekt (hier: Ebene) im Hin- und Rückweg in Relation zur mittleren Geschwindigkeit
 - Doppelter Einfluss eines etwaigen Delays $\Delta t_{\text{delay}} = \frac{\bar{d}_{\text{Hin}} - \bar{d}_{\text{Rück}}}{2\bar{v}}$



Ernst (2021)

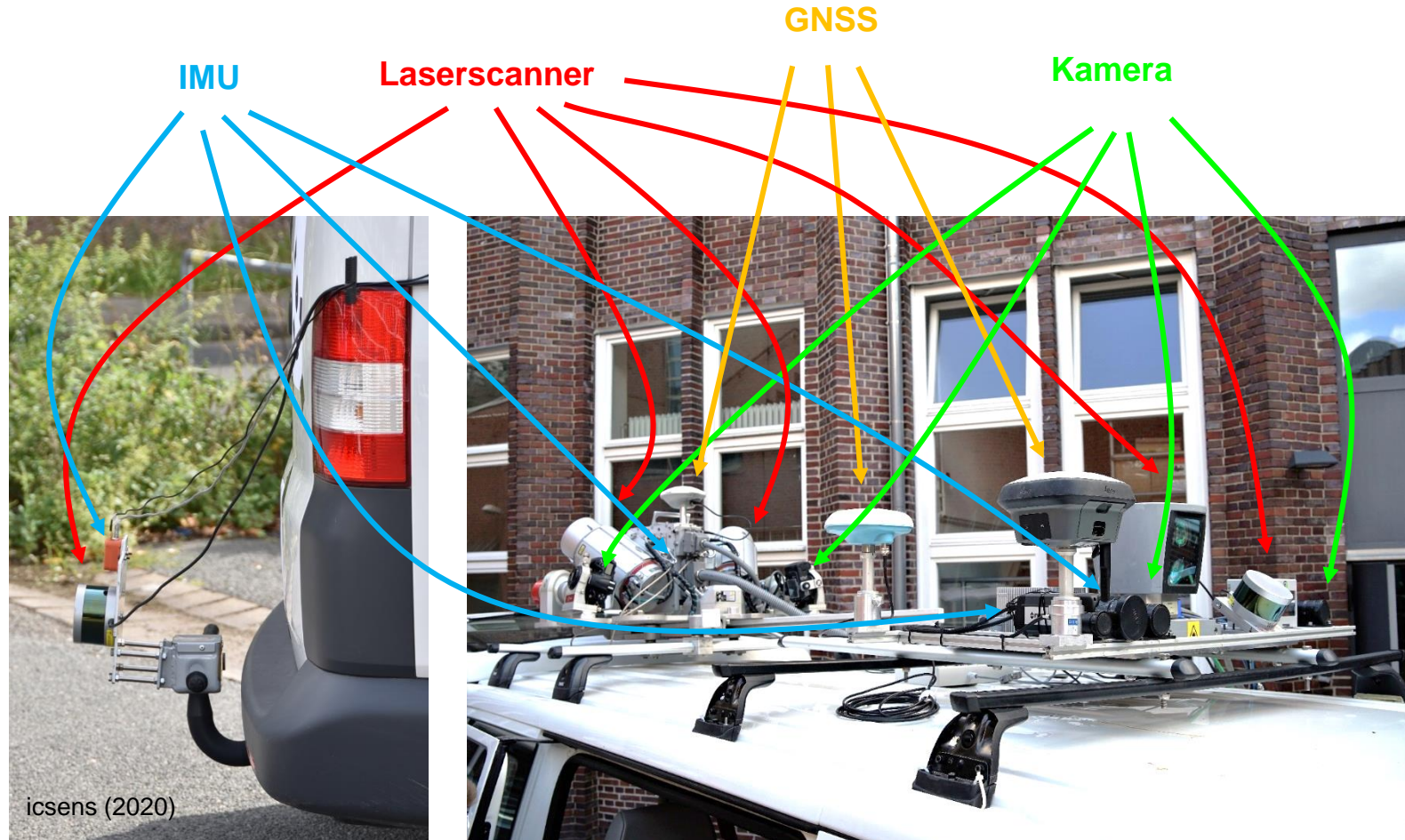


- Analyse eines möglichen Delays anhand kinematischer Messungen
 - Überprüfen einer Abweichung während Vorwärts- und Rückwärtsfahrt auf Systematik mittels Referenzpunktvolke
 - Abstand (aus kinematischer Punktwolke) zu einem Referenzobjekt (hier: Ebene) im Hin- und Rückweg in Relation zur mittleren Geschwindigkeit
 - Doppelter Einfluss eines etwaigen Delays $\Delta t_{\text{delay}} = \frac{\bar{d}_{\text{Hin}} - \bar{d}_{\text{Rück}}}{2\bar{v}}$

Messung	Differenz [mm]	Geschwindigkeit [mm/s]	Delay [ms]
I	0,77	147	2,62
II	6,64	146	22,67
III	0,48	119	2,03
IV	2,43	434	2,80

Ernst (2021)

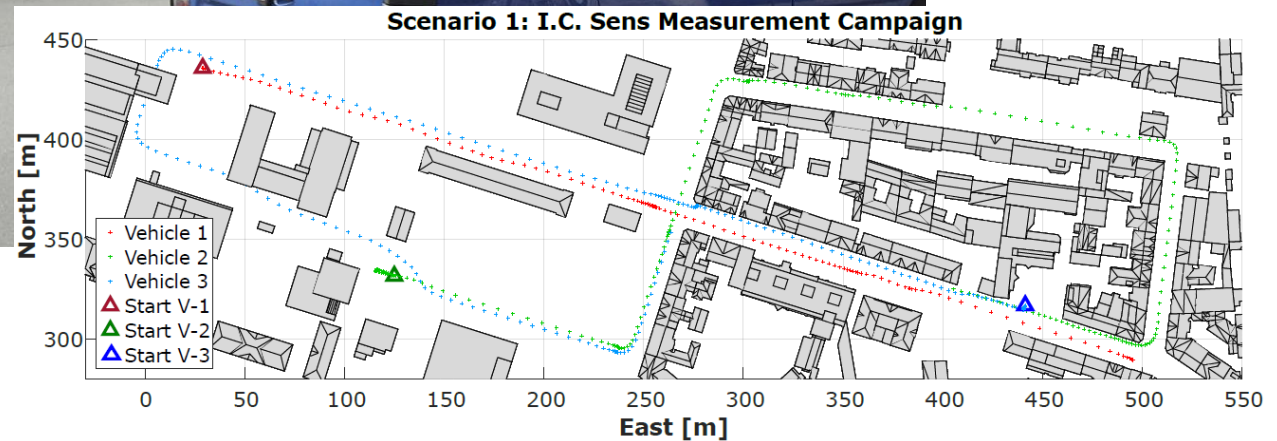
Σ +2,53 ms



- Verwendung der GPS-Zeit zur Synchronisation



Schön et al. (2018)



■ Verwendung der GPS-Zeit zur Synchronisation

- Durchführung von externem Tracking mittels Lasertracker

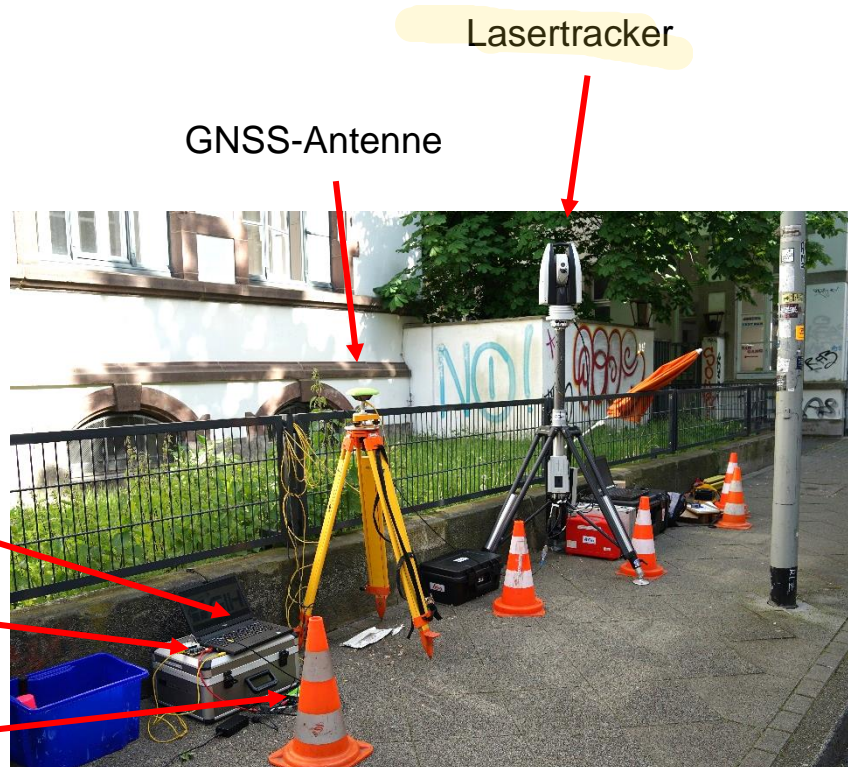


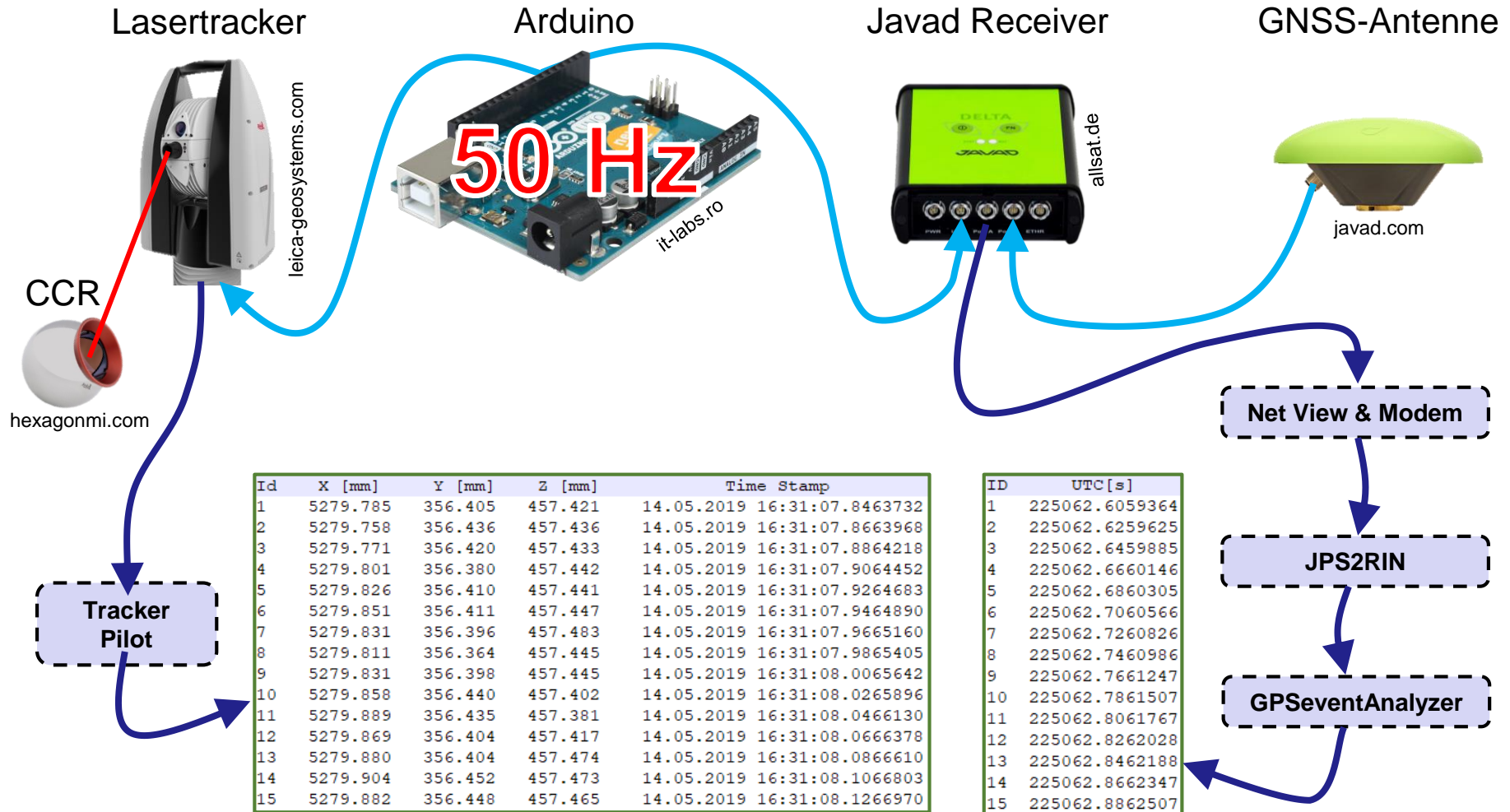
Vogel (2020)

Datenspeicherung

Externer Trigger

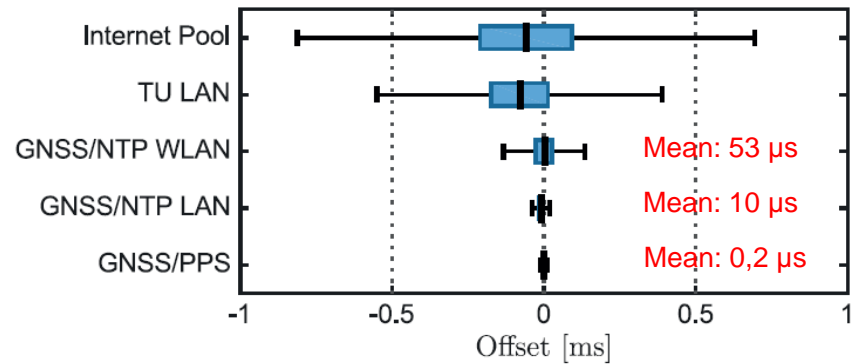
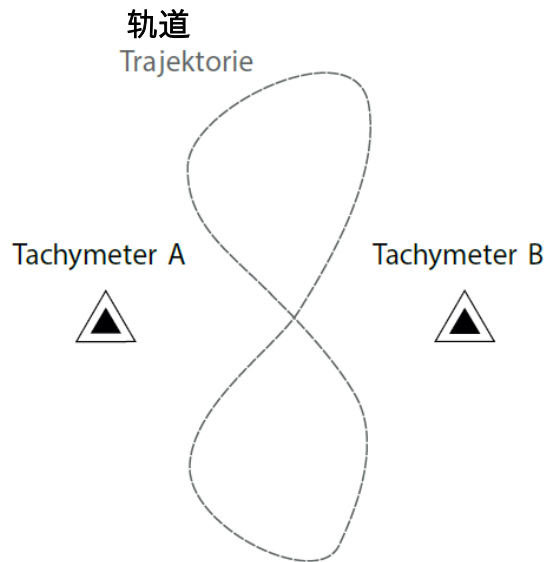
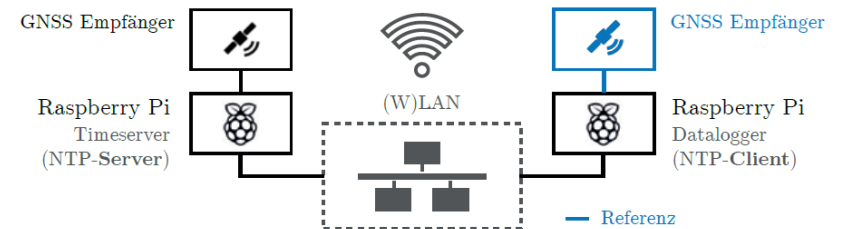
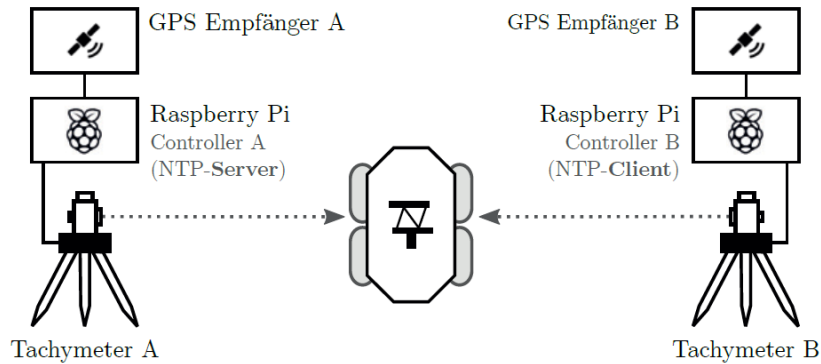
GNSS-Receiver







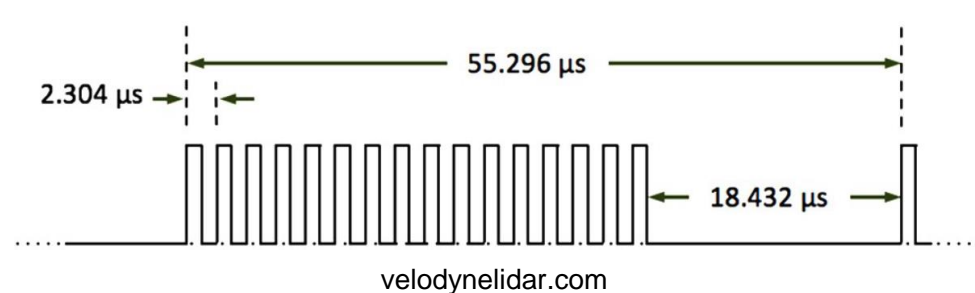
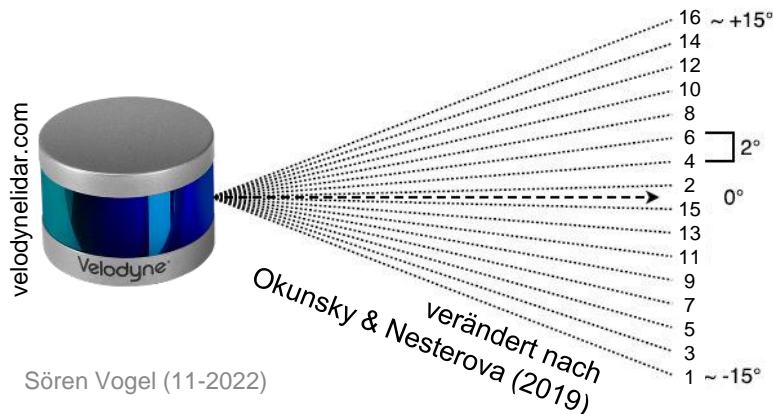
Beispiel: NTP für die Synchronisation eines MSS



Thalmann & Neuner (2018)

- Zwei Arten von Datenpaketen des Sensors:
 - **Datenpakete:** 3D-Messung, kalibrierte Reflektivität, Zeitstempel, (Modellkennung, Laser-Return-Modus)
 - **Positions-/GPS-Pakete:** letzte empfangene NMEA-Nachricht, Status des PPS-Signals
- **Firing sequence** → alle Laser im Sensor werden innerhalb von 55.296 μs ausgelöst
 - 16 einzelne Laserkanäle (mit festem bestimmten Elevationswinkel) mit jeweils einem 903-nm-Laser-Emitter- und -Detektorpaar
 - 24 firing sequences sind in einem Paket von 12 Datenblöcken enthalten
- Der Zeitstempel markiert den Zeitpunkt des ersten Datenpunkts in der ersten firing sequences des ersten Datenblocks
 - Anzahl der seit dem Stundenanfang verstrichenen Mikrosekunden (0 to 3,599,999,999 μs)
 - Synchronisierung mit der UTC-Zeit

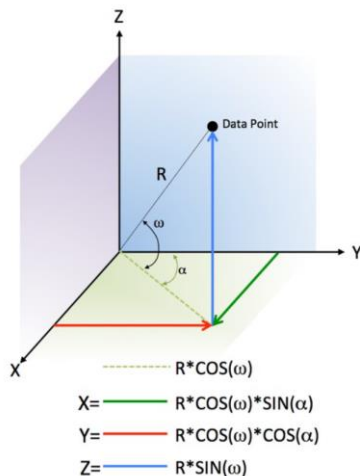
点火顺序



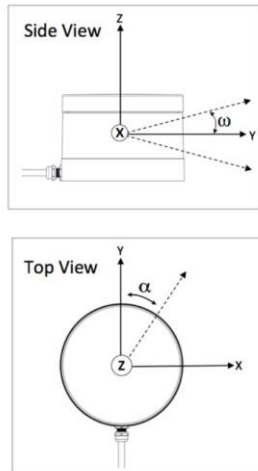
- Berechnung des genauen Zeitpunkts für jeden Datenpunkt in einem Paket
 - In Bezug auf die Laser-ID & firing sequence

$$TimeOffset = (55.296 \mu s \cdot SequenceID) + (2.304 \mu s \cdot LaserID)$$

$$ExactPointTime = Timestamp + TimeOffset$$



velodynelidar.com



	Data Blocks											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Strongest		Strongest		Strongest		Strongest		Strongest		Strongest	
Laser Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.000	110.592	221.184	331.776	442.368	552.960	663.552	774.144	884.736	995.33	1,105.92	1,216.51
2	2.304	112.896	223.488	334.080	444.672	555.264	665.856	776.448	887.040	997.63	1,108.22	1,218.82
3	4.608	115.200	225.792	336.384	446.976	557.568	668.160	778.752	889.344	999.94	1,110.53	1,221.12
4	6.912	117.504	228.096	338.688	449.280	559.872	670.464	781.056	891.648	1,002.24	1,112.83	1,223.42
5	9.216	119.808	230.400	340.992	451.584	562.176	672.768	783.360	893.952	1,004.54	1,115.14	1,225.73
6	11.520	122.112	232.704	343.296	453.888	564.480	675.072	785.664	896.256	1,006.85	1,117.44	1,228.03
7	13.824	124.416	235.008	345.600	456.192	566.784	677.376	787.968	898.560	1,009.15	1,119.74	1,230.34
8	16.128	126.720	237.312	347.904	458.496	569.088	679.680	790.272	900.864	1,011.46	1,122.05	1,232.64
9	18.432	129.024	239.616	350.208	460.800	571.392	681.984	792.576	903.168	1,013.76	1,124.35	1,234.94
10	20.736	131.328	241.920	352.512	463.104	573.696	684.288	794.880	905.472	1,016.06	1,126.66	1,237.25
11	23.040	133.632	244.224	354.816	465.408	576.000	686.592	797.184	907.776	1,018.37	1,128.96	1,239.55
12	25.344	135.936	246.528	357.120	467.712	578.304	688.896	799.488	910.080	1,020.67	1,131.26	1,241.86
13	27.648	138.240	248.832	359.424	470.016	580.608	691.200	801.792	912.384	1,022.98	1,133.57	1,244.16
14	29.952	140.544	251.136	361.728	472.320	582.912	693.504	804.096	914.688	1,025.28	1,135.87	1,246.46
15	32.256	142.848	253.440	364.032	474.624	585.216	695.808	806.400	916.992	1,027.58	1,138.18	1,248.77
16	34.560	145.152	255.744	366.336	476.928	587.520	698.112	808.704	919.296	1,029.89	1,140.48	1,251.07
1	55.296	165.888	276.480	387.072	497.664	608.256	718.848	829.440	940.032	1,050.62	1,161.22	1,271.81
2	57.600	168.192	278.784	389.376	499.968	610.560	721.152	831.744	942.336	1,052.93	1,163.52	1,274.11
3	59.904	170.496	281.088	391.680	502.272	612.864	723.456	834.048	944.640	1,055.23	1,165.82	1,276.42
4	62.208	172.800	283.392	393.984	504.576	615.168	725.760	836.352	946.944	1,057.54	1,168.13	1,278.72
5	64.512	175.104	285.696	396.288	506.880	617.472	728.064	838.656	949.248	1,059.84	1,170.43	1,281.02
6	66.816	177.408	288.000	398.592	509.184	619.776	730.368	840.960	951.552	1,062.14	1,172.74	1,283.33
7	69.120	179.712	290.304	400.896	511.488	622.080	732.672	843.264	953.856	1,064.45	1,175.04	1,285.63
8	71.424	182.016	292.608	403.200	513.792	624.384	734.976	845.568	956.160	1,066.75	1,177.34	1,287.94
9	73.728	184.320	294.912	405.504	516.096	626.688	737.280	847.872	958.464	1,069.06	1,179.65	1,290.24
10	76.032	186.624	297.216	407.808	518.400	628.992	739.584	850.176	960.768	1,071.36	1,181.95	1,292.54
11	78.336	188.928	299.520	410.112	520.704	631.296	741.888	852.480	963.072	1,073.66	1,184.26	1,294.85
12	80.640	191.232	301.824	412.416	523.008	633.600	744.192	854.784	965.376	1,075.97	1,186.56	1,297.15
13	82.944	193.536	304.128	414.720	525.312	635.904	746.496	857.088	967.680	1,078.27	1,188.86	1,299.46
14	85.248	195.840	306.432	417.024	527.616	638.208	748.800	859.392	969.984	1,080.58	1,191.17	1,301.76
15	87.552	198.144	308.736	419.328	529.920	640.512	751.104	861.696	972.288	1,082.88	1,193.47	1,304.06
16	89.856	200.448	311.040	421.632	532.224	642.816	753.408	864.000	974.592	1,085.18	1,195.78	1,306.37

velodynelidar.com

- Hennes, M.; Urban, S.; Wursthorn, S. (2014): Zur Synchronisierung von Multi-Sensor-Systemen – Grundlagen und Realisierung. In: DVW-Schriftreihe, Vol. 75., pp. 25-37.
- Thalmann, T. and Neuner, H. (2021): Temporal calibration and synchronization of robotic total stations for kinematic multi-sensor-systems. In: Journal of Applied Geodesy. 15 1, pp. 13–30.
- Voges, R., Wieghardt, C. S., and Wagner, B. (2017): TIMESTAMP OFFSET DETERMINATION BETWEEN AN ACTUATED LASER SCANNER AND ITS CORRESPONDING MOTOR, ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-1/W1, 99–106.
- Stempfhuber, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 576.
- Qiu, M., Qiu, Y., Yang, Y., & Bai, Y. (2020). Research on GPS Timing Remote Synchronization Algorithm in High Altitude Meteorological Data Acquisition System. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 740, No. 1, p. 012209). IOP Publishing.
- Koo, K. Y., Hester, D., & Kim, S. (2019). Time synchronization for wireless sensors using low-cost gps module and arduino. Frontiers in Built Environment, 82
- Liu, S., Yu, B., Liu, Y., Zhang, K., Qiao, Y., Li, T. Y., ... & Zhu, Y. (2021). Brief industry paper: The matter of time—A general and efficient system for precise sensor synchronization in robotic computing. In 2021 IEEE 27th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS) (pp. 413-416). IEEE.
- Hesse, C. (2007): Hochauflösende kinematische Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 608.
- Hanus, R. (2019). Time delay estimation of random signals using cross-correlation with Hilbert transform. Measurement, 146, 792-799.
- Ernst, D. (2021): Development of a quality model for the uncertainty judgement of a kinematic TLS-based multi-sensor system. Master Thesis (unpublished). Leibniz Universität Hannover. Geodätisches Institut.
- Schön, S.; Brenner, C.; Alkhatib, H.; Coenen, M.; Dbouk, H.; Garcia-Fernandez, N.; Fischer, C.; Heipke, C.; Lohmann, K.; Neumann, I.; Nguyen, U.; Paffenholz, J.-A.; Peters, T.; Rottensteiner, F.; Schachtschneider, J.; Sester, M.; Sun, L.; Vogel, S.; Voges, R. und Wagner, B. (2018): Integrity and Collaboration in Dynamic Sensor Networks. . In: Sensors. Schön, Steffen; Brenner, Claus; Alkhatib, Hamza; Coenen, Max; Dbouk, Hani; Garcia-Fernandez, Nicolas; Fischer, Colin; Heipke, Christian; Lohmann, Katja; Neumann, Ingo; Nguyen, Uyen; Paffenholz, Jens-André; Peters, Torben; Rottensteiner, Franz; Schachtschneider, Julia; Sester, Monika; Sun, Ligang; Vogel, Sören; Voges, Raphael; Wagner, Bernardo. 18 7, 21.
- Vogel, S. (2020): Kalman Filtering with State Constraints Applied to Multi-sensor Systems and Georeferencing. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 856.
- Thalmann, T. und Neuner, H. (2018): Untersuchung des Network Time Protocols für die Synchronisation von Multi-Sensor-Systemen. Evaluation of the Network Time Protocol for Synchronization of Multi-Sensor-Systems. In: AVN (Allgemeine Vermessungs-Nachrichten), 125 6, 163–174.
- Okunsky, M. V., and N. V. Nesterova. "Velodyne LIDAR method for sensor data decoding." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 516. No. 1. IOP Publishing, 2019.
- Herrmann, Ch.; Hennes, M.; Juretzko, M.; Schneider, M.; Munziger, Ch. (2010): Positioning and Synchronization of Industrial Robots. Proceedings of the 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Mautz, R., Kunz, M. and Ingensand, H. (eds.), IEEE Xplore, p. 436-440.
- Gojcic, Z., Kalenjuk, S., & Lienhart, W. (2017, October). Synchronization routine for real-time synchronization of robotic total stations. In INGENEO 2017: Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Surveying (pp. 83-91).
- Paffenholz, J.-A. (2012): Direct geo-referencing of 3D point clouds with 3D positioning sensors. Ph.D. Thesis. München. DGK, Reihe C. 689.
- Toth, C.; Shin, S. W.; Grejner-Brzezinska, D. A. und Kwon, J. H. (2008): On accurate time synchronization of multi-sensor mobile mapping systems. . In: Journal of Applied Geodesy. Toth, Charles; Shin, Sung Woong; Grejner-Brzezinska, Dorota A.; Kwon, Jay Hyoun. 2 3, pp. 159-166.