

# Untersuchungen zur Datenreduktion durch Sub-Histogrammbildung bei der LiDAR-Signalverarbeitung

Torben Neumann  
Hybrid Lidar Systems AG, TecCenter 1, Bad Salzdetfurth, Deutschland,  
neumann@hybrid-lidar.com

## Kurzfassung:

Da bei der Realisierung von LiDAR-Sensoren meist nur ein begrenzter Speicher hardwareseitig zur Verfügung steht sind Verfahren zur Datenreduktion bei der Sensordatenverarbeitung notwendig. In dieser Arbeit wird die Anwendung sogenannter „Page Replacement“ Algorithmen auf LiDAR-Rohdaten als neuer Ansatz zur Datenreduktion im LiDAR-Bereich dargestellt. Ziel ist es den Speicherbedarf je Pixel innerhalb eines LiDAR-Systems durch eine Sub-Histogrammbildung zu reduzieren.

Die aus dem Bereich der Computertechnik stammenden Algorithmen, sind dort für die Datenauslagerung vom physischen zum virtuellen Arbeitsspeicher zuständig. Untersucht wurden die folgenden Verfahren:

- First-In-First-Out (FIFO)
- Random
- Least-Recently-Used (LRU)
- Optimal Page Replacement
- Second Chance
- Most-Recently-Used (MRU)
- Clock

**Schlüsselwörter:** LiDAR, Histogramming, Page Replacement-Algorithmen, Sub-Histogrammbildung, Signalauswertung

## 1. Einleitung

Im Bereich Light Detection and Ranging (LiDAR) kann die Abstandsmessung mithilfe von Histogrammen durchgeführt werden. Diese stellen kumuliert die detektierten Ereignisse je Pixel über mehrere Shots dar. Bei einer Auflösung von 100 ps und einer Messdauer von 2 µs ergeben sich 20.000 Bins je Pixel, deren Werte abgespeichert werden müssen. Bei einer Auflösung im 4k-Bereich resultiert daraus eine erhebliche Datenmenge. Wird von einer Laserpulsdauer von 3 ns ausgegangen, so sind lediglich 30 Bins pro Echo relevant.

Um den Speicheraufwand und die Datenübertragung gering zu halten, muss während der Laufzeit eine Identifikation des relevanten Datenbereichs erfolgen. Dieses kann unter anderem wie in [1] auf Basis eines FPGAs umgesetzt werden. Eine Kombination aus direktem und indirektem Time-of-Flight (ToF) Verfahren sorgt hier für die direkte Bestimmung des maximalen Peaks pro Pixel. Da im vorliegenden Anwendungsfall ausschließlich direkte ToF Verfahren wie Flash-/Sequentiell-Flash LiDAR zum Einsatz kommen, wurde ein neuer Verfahrensansatz erarbeitet.

Im Folgenden wird zunächst der prinzipielle Ansatz zur Datenerfassung und Bewertung dargestellt. Dieser ist unabhängig von der zusätzlich verwendeten Substitutionsmethode. Im Anschluss daran werden die getesteten Methoden erläutert und deren Ergebnisse nach Anwendung innerhalb der LiDAR-Signalverarbeitung grafisch dargestellt. Dann erfolgt der Vergleich der erarbeiteten Methoden inklusive einer Bewertung. Zuletzt werden weitere Randbedingungen und Optimierungsansätze diskutiert.

## 2. Basiskonzept

Die Grundlage aller Verfahren [2] bildet die Unterteilung der Shotdauer (Zeit zwischen zwei Sendepulsen zur Detektion des reflektierten Laserpulses) in Makrointervalle, sogenannte Makrobins (MB). Diese umfassen die Länge eines Laserpulses (hier: 30 Einzelbins (EB)). Über die Shotdauer sind somit ca. 667 Makrobins verteilt.

Da es vorkommen kann, dass ein empfangenes Echo genau zwischen zwei Makrobins liegt, wird eine weitere solche Ebene hinzugefügt, die um die halbe Länge verschoben ist, genannt

Shifted-Makrobins (SB). [2] Dieser Zusammenhang wird in **Abb. 1** visualisiert.

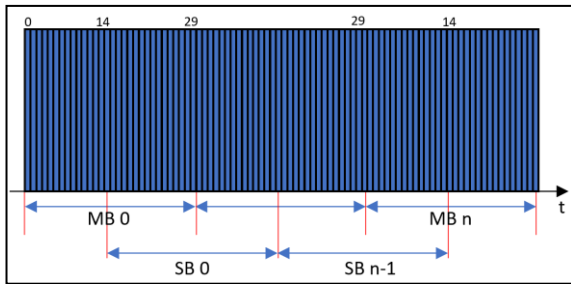


Abb. 1: Aufteilung der Shotdauer (vgl. [2])

Jedes detektierte Event kann somit einem Einzel-, Makro- und Shifted-Makrobin zugeordnet werden. Diese Informationen werden in einem begrenzten Speicher abgelegt, der von links nach rechts befüllt wird (siehe **Abb. 2**).

Jedes mögliche neue Event erhöht neben seinem eigenen auch die korrespondierenden Zähler der bestehenden Elemente bevor es in den Speicher abgelegt wird. Solange freie Plätze vorhanden sind, wird jedes Event aufgenommen. Erst bei einem vollen Speicher muss eine Entscheidung getroffen werden, ob das neue Event aufgenommen wird und wenn ja, welches bisherige dafür im Speicher substituiert wird. Diese Entscheidung wird mit Hilfe der „Page-Replacement“-Algorithmen gesteuert.

Einzelbin ID				...	
Einzelbin-Zähler				...	
Makrobin-Zähler				...	
Shifted-Makrobin-Zähler				...	
	0	1	2	...	m

Abb. 2: Speicherformat

Die Länge  $m$  des Speichers (siehe **Abb. 2**) ist durch die maximale Anzahl möglicher Events je Pixel pro Shot unter Berücksichtigung der Totzeit definiert. Bei einer Entfernungsmessung von max. 220 m und einer Pixeltotzeit der Single-Photon-Avalanche-Diode (SPAD) von 12 ns ergibt sich die Speicherlänge zu 123. Nur so besteht die Möglichkeit alle möglichen Events des ersten Shots aufzunehmen. Für die Ersetzungsstrategie werden die Zählerstände (MB, SB) des aktuellen Events mit denen der gespeicherten verglichen. Alle gespeicherten Events mit schlechterer oder gleicher Zähler-summe sind potentielle Substitutionskandidaten.

Nach Abschluss des Verfahrens sind hier lediglich 123 EBs zu berücksichtigen, die im Optimalfall alle 30 EBs des Zielobjekt-Echos beinhalten.

### 3. „Page-Replacement“ Verfahren

Die „Page-Replacement“-Verfahren wählen bei der virtuellen Arbeitsspeicherverwaltung des Computers aus, welche Daten vom physischen in den virtuellen Speicher verschoben werden. Hierbei ist das Ziel, die Anzahl möglicher Page-Faults, d.h. Zugriffe auf Elemente des virtuellen Speichers gering zu halten [3].

Um deren Anwendungsmöglichkeit im Bereich LiDAR zu testen, werden jeweils 400 Shots bei verschiedenen Signal-to-Noise-Ratios (SNR) und Distanzen simuliert und die detektierten Zeitstempel mittels der jeweiligen Verfahren im Speicher abgelegt. Als Bewertungskriterium wird die korrekte Anzahl an Einzelbins genommen, die zur Sub-Histogrammbildung zur Verfügung stehen. Im Optimalfall werden 30 Stück erreicht.

#### A. First-In-First-Out (FIFO)

Beim FIFO Algorithmus wird das Element, welches am längsten im Speicher liegt ersetzt [4]. In unserem Anwendungsfall analog dazu das längst gespeicherte Element aus der Liste potentieller Substitutionskandidaten.

Das Resultat der Anwendung auf LiDAR-Rohdaten (Zeitstempel) zeigt die folgende Abbildung (**Abb. 3**).

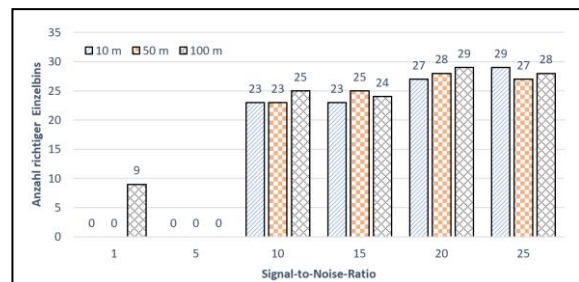


Abb. 3: Anzahl erreichter Einzelbins im Speicher bei verschiedenen SNR-Werten und Distanzen durch FIFO

Es ist zu erkennen, dass der Optimalfall bei keinem getesteten SNR-Wert erreicht wird. Bei einer SNR von eins oder fünf lässt sich zudem kein Ergebnis erzielen. Das einzige Resultat in diesem Bereich ist dem Zufall geschuldet, da ansonsten bei einer höheren SNR von fünf und 100 m Messdistanz ebenfalls ein Peak vorliegen müsste.

#### B. Random

Beim Random Verfahren wird zufällig ein Element aus der Substitutionsliste ausgewählt und ersetzt. Dieses Vorgehen kann in vielen Fällen besser als das FIFO Prinzip sein, liefert jedoch auch bei gleichen Eingangsdaten unterschiedliche Ergebnisse. Da im Bereich der LiDAR-

Sensorik die Reproduzierbarkeit wichtig ist, wurde dieses Verfahren nicht weiter untersucht.

### C. Least-Recently-Used (LRU)

Dieses Verfahren ersetzt jenes Element im Speicher, welches als längstes nicht mehr bearbeitet wurde. Hierfür ist ein erheblicher Overhead nötig. [5]

Im Anwendungsfall stehen wieder nur Elemente der Substitutionsliste zur Verfügung. Das Ergebnis zeigt **Abb. 6**.

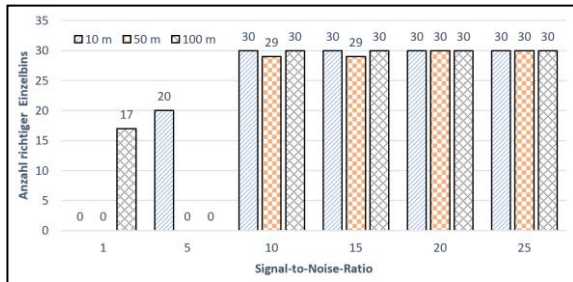


Abb. 6: Anzahl erreichter Einzelbins im Speicher bei verschiedenen SNR-Werten und Distanzen durch LRU

Bei höheren SNR-Werten liefert dieses Verfahren, unabhängig der Messdistanz, annähernd den Optimalfall. Bei einer SNR von fünf lässt sich erkennen, dass für die Messdistanzen 50 m und 100 m kein Ergebnis erzielt wird. Dieses könnte daran liegen, dass bei größerer Entfernung erst mehr Hintergrundlichtevents verarbeitet werden müssen, bevor nutzbare Events eintreffen und somit der Speicher falsch bestückt wird. Der Peak beim SNR-Wert von eins ist analog zum FIFO-Verfahren zu deuten.

### D. Optimal Page Replacement

Diese auch als Belady's Min Algorithmus bekannte Methode, sieht eine Ersetzung des Elementes vor, auf welches zukünftig am längsten nicht zugegriffen wird [5]. Da die zukünftigen Events in unserer Anwendung nicht bekannt sind, kann dieser lediglich im Nachhinein als Referenzmethode verwendet werden.

### E. Second Chance

Der Second Chance Algorithmus ist eine Verbesserung des FIFO. Ein Element wird nur aus dem Speicher entfernt, wenn es am längsten im Speicher lag und nicht verwendet wurde. Hierfür wird jedem Speicherelement ein zusätzliches R-Bit hinzugefügt, welches bei Wiederverwendung auf eins gesetzt wird. [4]

Die Darstellung der Ergebnisse liefert **Abb. 4**.

Analog zum LRU Verfahren liefert der Second Chance Algorithmus bei höheren SNR-Werten annähernd den Optimalfall. Auch hier ist bei

einer SNR von fünf die zusätzliche Abhängigkeit der Messdistanz zu erkennen.

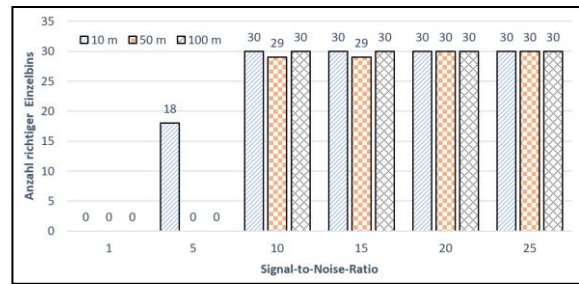


Abb. 4: Anzahl erreichter Einzelbins im Speicher bei verschiedenen SNR-Werten und Distanzen durch 2nd Chance

### F. Most-Recently-Used (MRU)

Die Algorithmen MRU und LRU sind funktions-technisch identisch. Sie unterscheiden sich lediglich in dem zu ersetzenden Element. Hier wird jenes Element ersetzt, welche zuletzt verwendet wurde. Nach Anwendung des MRU-Algorithmus auf die LiDAR-Daten resultiert folgendes Ergebnis (**Abb. 5**):

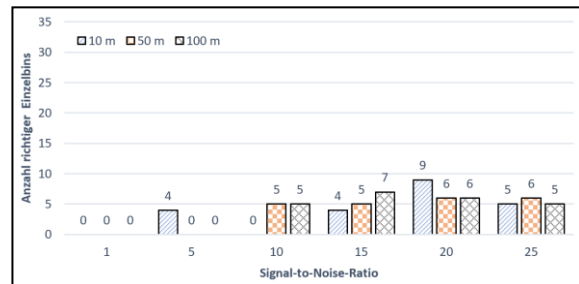


Abb. 5: Anzahl erreichter Einzelbins im Speicher bei verschiedenen SNR-Werten und Distanzen durch MRU

Dieser Algorithmus liefert zwar die richtigen Makrointervalle, jedoch reichen die im Speicher abgelegten Einzelbins nicht zur Bildung der gewünschten Subhistogramme aus.

### G. Clock

Der Clock Algorithmus ist identisch zum Second Chance Algorithmus. Der Unterschied liegt lediglich in der Implementierung. Hier wird ein kreisförmiger Speicher angelegt, der die ständige Verschiebung der Seiten im Speicher des Second Chance Algorithmus umgeht. [4] Aufgrund dessen ist für den Leistungsvergleich keine eigenständige Untersuchung nötig.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Algorithmen lassen sich unter Berücksichtigung der erreichten Ergebnisse wie folgt priorisieren:

1. LRU
2. Second Chance
3. FIFO
4. MRU

Bei niedrigen SNR-Werten (kleiner 10) überzeugt keiner der gewählten Algorithmen. Zum einen ist keine korrekte Eingrenzung des relevanten Datenbereichs möglich (MB oder SB). Zum anderen ist die zum falsch gewählten Datenbereich zugehörige Einzelbinanzahl signifikant (**Abb. 7**). Dieses erschwert die Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und auch die korrekte Bestimmung der ToF-Zeit.

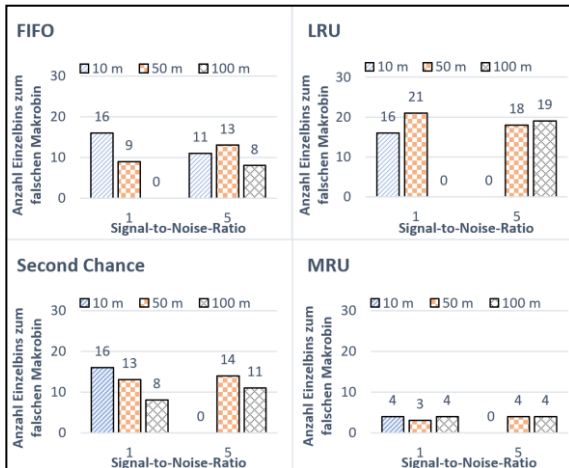


Abb. 7: Einzelbinanzahl (Maximum) zur falschen Eingrenzung (Makro-/Shifted-Makrobin)

Die Idee, dass neben der reinen Peak-Findung auch Bereiche mit niedrigerer SNR erkannt werden, um eine nachträgliche Weiterverarbeitung und ToF-Zeitermittlung durchzuführen, konnte nicht bestätigt werden.

Zusätzlich zum SNR-Wert sind zukünftig noch Einflüsse weiterer Parameter auf den Datenreduktions-Algorithmus durchzuführen. Hierbei sind insbesondere Messungen über weite Distanzen (bis 220 m), mit höherem Hintergrundrauschen und mit mehr als einem reflektierendem Zielobjekt im Field-of-View des Pixels zu analysieren. Des Weiteren ist die Idee der hardwarenahen Umsetzung auch bei der softwareseitigen Algorithmenentwicklung zu berücksichtigen.

Für die weitere Algorithmenentwicklung könnte eine Vorfilterung der Daten auf Basis der Hintergrundlichtintensität erfolgen.

Da die Ersetzungsstrategie beliebig austauschbar ist, kann unter Einbezug weiterer Bewertungskriterien über eine andere Ersetzungsstrategie nachgedacht werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] S. Park, B. Kim, J. Cho, J.H. Chun, J. Choi, S.J. Kim, An 80x60 Flash LiDAR Sensor with In-Pixel Histogramming TDC Based on Quaternary Search and Time-Gated  $\Delta$ -Intensity Phase Detection for 45m Detectable Range and Background Light cancellation, *IEEE ISSCC*, 98-100 (2022); doi: 10.1109/ISSC42614.2022.9731112
- [2] L. Gasparini, N. Massari, M. Gandola, M. Franks, Hybrid Lidar Feasibility – New Algorithm, (2022); interne Quelle von Hybrid Lidar Systems AG und FBK (nicht öffentlich zugänglich)
- [3] S. Peterson, A.S. Gillis, S. Lelii, Virtueller Arbeitsspeicher (Virtual Memory), *Computer Weekly*, (2022); Online erreichbar: <https://www.computerweekly.com/de/definition/Virtueller-Arbeitsspeicher>
- [4] A.S. Tanenbaum, Modern Operating Systems, *Prentice Hall* (2001); isbn: 978-0-13-031358-4
- [5] A.S. Chavan, K.R. Nayak, K.D. Vora, M.D. Purohit, P.M. Chawan, A Comparison of Page Replacement Algorithms, *International Journal of Engineering and Technology* 3, 171-174 (2011); doi: 10.7763/IJET.2011.V3.218