



Imaging Solutions - WHITEPAPER

Highspeed-Video - Die optimalen Aufnahmeparameter

Der Weg zu aussagekräftigen Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen

Jede Hochgeschwindigkeits-Kamera ist über ihre technischen Spezifikationen beschrieben. Dabei sind die Basis-Parameter Aufzeichnungsgeschwindigkeit, aktive Sensorauflösung und Aufnahmezeit logisch miteinander verknüpft. Zur Erstellung aussagekräftiger Aufnahmen müssen diese Parameter auf die jeweilige Anwendung angepasst und optimal gewählt werden. Im Zusammenspiel mit der jeweiligen Optik, ist die Belichtungszeit der Kamera, also der Zeitraum über den jedes einzelne Bild aufgezeichnet/belichtet wird, von entscheidender Bedeutung für die Qualität der gewonnen Bilddaten.

Dieses Whitepaper vermittelt einen Überblick über diese logischen Zusammenhänge und liefert Empfehlungen für die optimale Wahl der wichtigsten Aufnahmeparameter.

- Aufzeichnungsgeschwindigkeit (FPS)**
- Aktive Sensorauflösung (ROI)**
- Belichtungszeit**
- Objektivblende**
- Aufnahmezeit & Speichermanagement**



Imaging Solutions GmbH
Professional Imaging & Light Solutions

Inhalt:

- 1.0 Logischer Zusammenhang von Aufnahmegeschwindigkeit, Sensorauflösung und Aufnahmezeit
- 2.0 Aufzeichnungsgeschwindigkeit (FPS)
- 3.0 Aktive Sensorauflösung (ROI)
- 4.0 Belichtungszeit - Exposure Time - Shutter Time
- 5.0 Belichtungszeit vs. Objektivblende (Schärfentiefe)
- 6.0 Speichermanagement & Trigger
- 7.0 Zusammenfassung

1.0 Logischer Zusammenhang von Aufnahmegeschwindigkeit, Sensorauflösung und Aufnahmezeit

Die maximale Aufnahmegeschwindigkeit eines Bild-Sensors bei einer bestimmten Auflösung ist durch dessen Design vorgegeben. Aufzeichnungen schneller als die Systemgrenzen bei Vollauflösung sind über eine Reduzierung der aktiven Sensorfläche, in diesem Zusammenhang auch als „Region Of Interest“, kurz ROI, bezeichnet, möglich. Bei reduzierter ROI muss der Bildsensor weniger Daten verarbeiten, da die Pixelmasse reduziert ist. Entsprechend können nun mit einer höheren Aufzeichnungsgeschwindigkeit (FPS) Bilddaten erfasst, oder bei gleicher Geschwindigkeit länger aufgezeichnet werden, da je Bild weniger Bildspeicher benötigt wird. Eine Abwägung und Kombination beider Vorteile ist ebenfalls möglich.

Nachstehend ein fiktives Beispiel für ein Kamerasystem mit Bildsensor (1920x1080 Pixel) @ 4000 fps, 3s Aufnahmezeit. Eine Reduzierung der ROI auf 1280 x 1024 ermöglicht zum einen eine maximale Aufzeichnungsgeschwindigkeit von 7.000 fps, oder bei gleichbleibender Aufzeichnungsgeschwindigkeit eine Verlängerung der Aufzeichnungszeit von 3s auf z.B. 6s. Die Grenzen dieser Parameter-Anpassungen sind für jedes Kamerasystem individuell spezifiziert.

ROI-Reduzierung ermöglicht eine höhere Aufzeichnungsgeschwindigkeit (fps)
und/oder durch Kombination

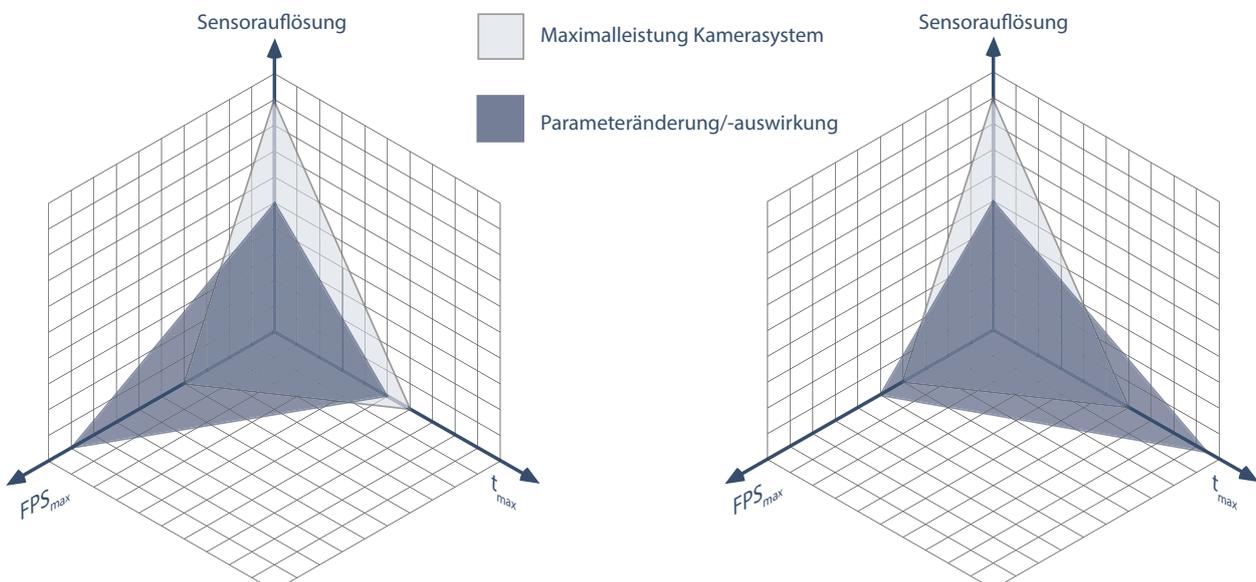
ROI-Reduzierung ermöglicht eine längere Aufzeichnungsgeschwindigkeit (t_{max})

Reduzierung der Aufzeichnungsgeschwindigkeit ermöglicht längere Aufzeichnungszeiten (t_{max})
und/oder durch Kombination

Reduzierung der Aufzeichnungsgeschwindigkeit ermöglicht eine höhere aktive Sensor-Auflösung (ROI)

ROI-Reduzierung auf 1280 x 1024 Pixel
Max. Geschwindigkeit von 7.000 fps
Aufnahmezeit bei V_{max} etwa bei 2.5s.

ROI-Reduzierung auf 1280 x 1024 Pixel
Geschwindigkeit bleibt bei 4000 fps
Aufnahmezeit auf 6s verlängert



2.0 Aufzeichnungsgeschwindigkeit

Der primär zu wählende Parameter bei der Aufzeichnung mit Hochgeschwindigkeits-Kamerasystemen, ist die benötigte Bildfrequenz bzw. Aufzeichnungsgeschwindigkeit in FPS (Frames Per Second). Diese ist durch die Spezifikationen des Kamerasystems gegeben und begrenzt.

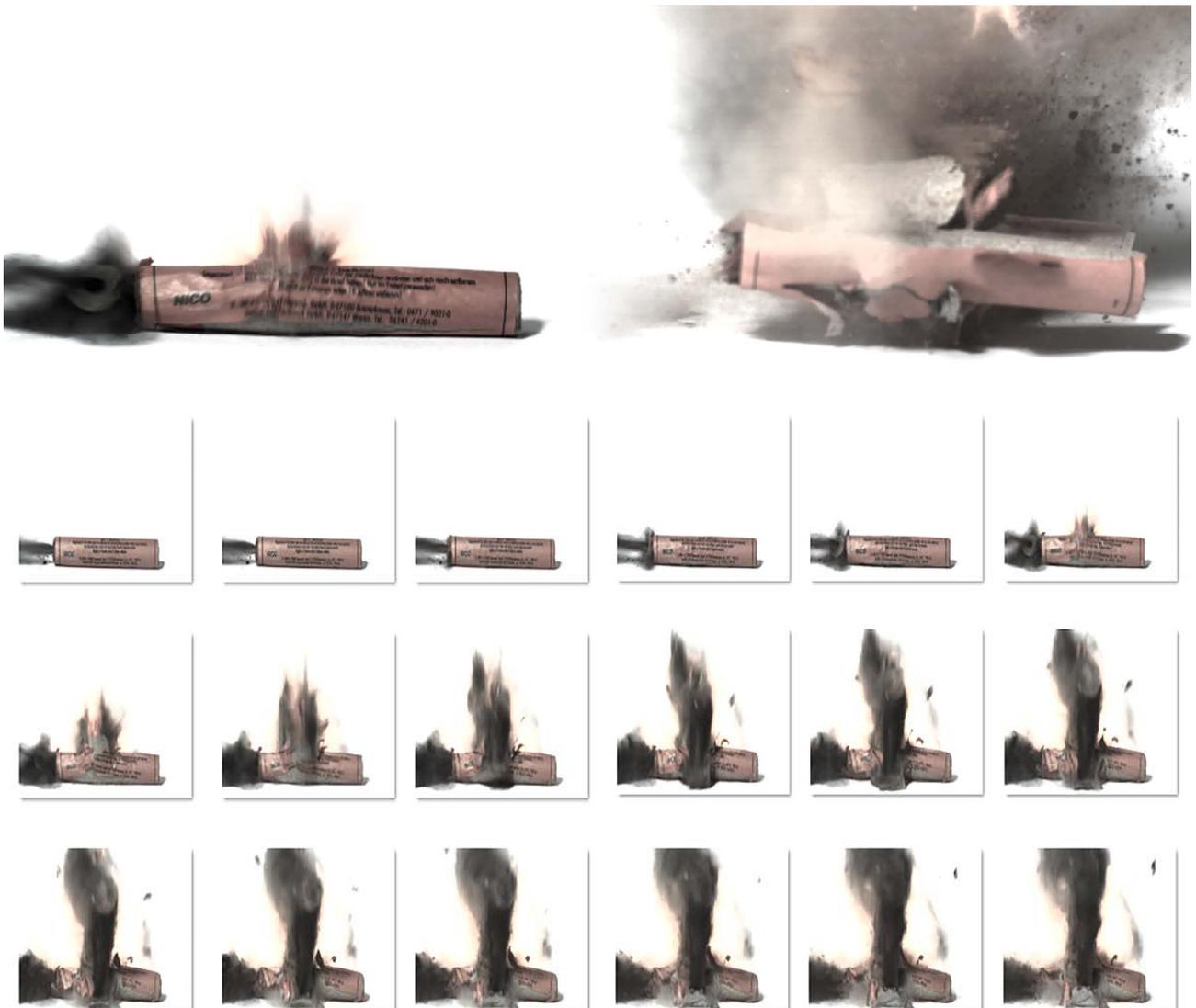
„Die optimale Aufzeichnungsgeschwindigkeit (fps) liegt zwischen 1-3 x Objektgeschwindigkeit (cm/s)“

Eine wirkliche Faustregel ist in diesem Zusammenhang nicht definierbar. Es handelt sich um Erfahrungswerte die im Laufe der Zeit erarbeitet wurden. Die zeitliche Auflösung eines Bewegungsvorganges obliegt letztendlich dem Anwender. Eine zu geringe Aufzeichnungsfrequenz führt zu einem Informationsverlust, eine zu hohe Aufzeichnungsfrequenz verursacht ein hohes Datenvolumen und führt mitunter zu einem „Dynamikverlust“ bei der Wiedergabe der Videodatei, da die Bewegung zu stark aufgelöst wird. Bei Rotationsgeschwindigkeiten sind diese Erkenntnisse entsprechend auf die Umfangsgeschwindigkeit oder die gewünschte Winkelauflösung anzuwenden.

Beispiele: Ein Prozess mit $V = 300 \text{ cm/s}$ ergibt eine Aufzeichnungsfrequenz von 300-900 fps.
Dies liefert eine Bewegungsauflösung von 0,3 cm (900fps) bis 1 cm (300 fps) pro Bild.

Ein Rotationsvorgang mit 6000 rpm, und einer gewünschten Winkelauflösung von $5^\circ/\text{Bild}$ bzw. 1,146 mm/Bild ergibt eine Aufzeichnungsgeschwindigkeit von 7200 fps.

Nachstehendes Beispiel zeigt einen Feuerwerkskörper bei 1000 fps (oben, zu wenig Information) und mit 10000 Bilder/Sekunde (unten, ausreichende Information). Für die vollständige Auflösung wären hier eher 20000-30000 fps angeraten.



3.0 Aktive Sensorauflösung (ROI)

Die aktive Sensorauflösung einer Kamera beschreibt die Fähigkeit eines Sensors Objekte und dessen Details optisch aufzulösen. Die aktive Sensorauflösung wird im allgemeinen als Region Of Interest, kurz ROI, bezeichnet.

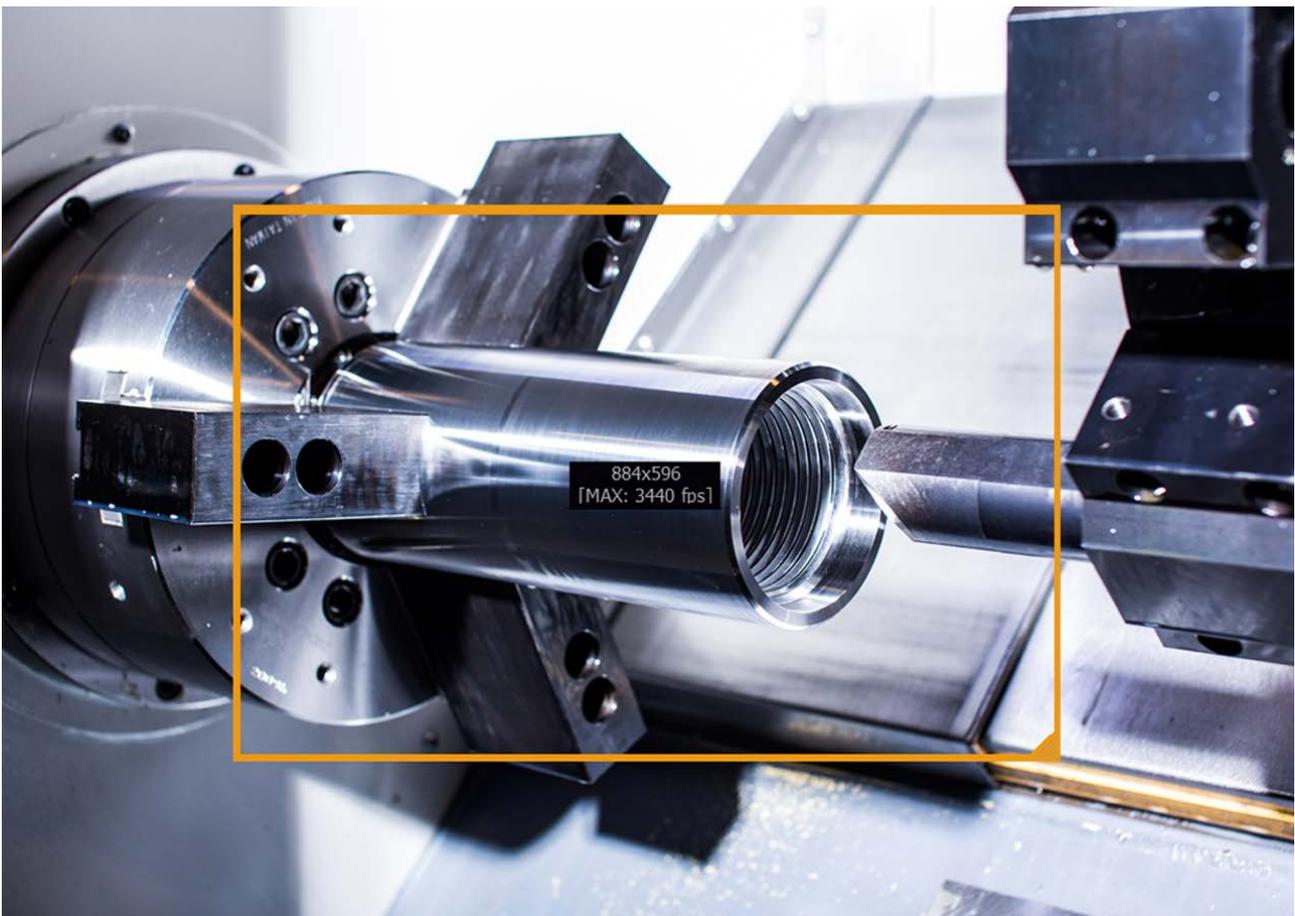
„Das kleinste zu beobachtende Detail im Gesamtbildinhalt sollte mit 4-6 Pixel aufgelöst werden“

Bei der Aufzeichnung von großformatigen Objekten (> 1m²) sind selten Details in Millimetergröße von Interesse, sondern eher eine komplexe Gesamtbewegung. Je kleiner das Objekt bzw. Detail von Interesse, je geringer ist in der Regel auch die gesamte Bildfläche. Zudem liefern im Grenzfall zwei Aufzeichnungen - eine für die Totale, eine für die Details - meist ein besseres Gesamtergebnis.

Zusätzlich führt das rechnerische Ergebnis der notwendigen Auflösung meist zu einer geringeren Auflösung als das Kamerasystem zu leisten vermag. Ein reduzierter Speicherbedarf pro Bild und die daraus resultierende längere Gesamtaufnahmezeit bilden einen zusätzlichen Nutzen für den Anwender (Vorkapitel).

Ein Beispiel: Wenn in einer Produktionsmaschine eine Bildfläche (FOV = FieldOfView) von 60 cm Breite aufgezeichnet werden soll, und das kleinste Detail von Interesse im FOV 0,5 cm klein ist, so genügt eine horizontale Auflösung von $60/0,5 * 6 \text{ Pixel} = 720 \text{ Pixel}$. Dies beschreibt die empfohlene Mindestanforderung an die horizontale Sensorauflösung.

Moderne Hochgeschwindigkeits-Kamerasysteme erlauben die interaktive Definition der ROI über die Systemsoftware. Dazu wird per Maus die gewünschte ROI einfach im Livebild aufgezogen. Die maximal mögliche Aufzeichnungsgeschwindigkeit wird entsprechend angezeigt



Positionierung der ROI auf dem Sensor:

Die Position dieser reduzierten ROI auf der Sensorfläche kann verschoben werden. Dies ist sehr hilfreich bei Aufnahmen mit hohem Vergrößerungsfaktor (Makro). Ein versehentliches Berühren des Stativs kann zum Verrutschen der Kameraposition führen. Meist ist es einfacher die ROI auf dem Sensor nachzujustieren, als das Stativ neu auszurichten.

4.0 Belichtungszeit - Exposure Time - Shutter Time

Neben der Aufzeichnungsgeschwindigkeit ist die Belichtungszeit einer der entscheidenden Parameter für perfekte Highspeed-Bildaufzeichnungen. Die Belichtungszeit definiert den Zeitraum wie lange der Sensor für jedes Einzelbild, lichtempfindlich geschaltet wird. Je kürzer dieser Zeitraum ist, je weniger Bewegungsunschärfen sind im Bild sichtbar. Die Begriffe Belichtungszeit, Exposure Time und Shutter Time sind in ihrer Bedeutung identisch und weit verbreitet.

„Bei der optimalen Belichtungszeit beträgt die Objektbewegung im Bildinhalt unter 2 Pixel“

Bei einer Beispielgeschwindigkeit von 1000 fps kann jedes einzelne Bild theoretisch maximal 1ms oder 1000 µs belichtet werden. Dies entspricht dem Kehrwert der gewählten Aufzeichnungsgeschwindigkeit. Da zum Auslesen des Sensors jedoch auch ein paar Mikrosekunden benötigt werden, reduziert sich dieser Zeitraum kameraabhängig um etwa 3 µs. Entsprechend beträgt die maximale Belichtungszeit im genannten Beispiel 997 µs.

Aber selbst in diesem kurzen Zeitraum bewegt sich das Objekt weiter. Bei einer Objektgeschwindigkeit von z.B. 5 m/s bewegt sich ein Objekt pro Einzelbild und Belichtungszeit 997 µs um 4,98 mm. Bewegungsunschärfen im Einzelbild sind sichtbar.

$$\text{Belichtungszeit } t_{\text{opt.}} (\mu\text{s}) = \frac{2 \times \text{Bildausschnitt (m)} \times 10^6}{\text{Objektgeschwindigkeit (m/s)} \times \text{ROI (horizontal oder vertikal)}} = \frac{2 \times 0,5\text{m} \times 10^6}{5\text{m} \times 1280} = 156 \mu\text{s}$$

Beispiel für eine zu lange Belichtungszeit

Bewegungsunschärfen im Bild,
Bewegungsdetails sind nur zu erahnen



t_0 Bild 1 1 ms Bild 2 2ms Bild 3

Belichtungszeit 997 µs Belichtungszeit 997 µs

Optimale Belichtungszeit

Keine Bewegungsunschärfe
Alle Details sichtbar



t_0 Bild 1 1 ms Bild 2 2ms Bild 3

Belichtungszeit 156 µs Belichtungszeit 156 µs

5.0 Belichtungszeit vs. Objektivblende (Schärfentiefe)

Die Belichtungszeit der Kamera und die Blendenöffnung des Objektivs stehen in unmittelbarem Zusammenhang

Belichtungszeit:	Zeitspanne über die der Kamerasensor belichtet wird	(Kameraeinstellung)
Objektivblende:	Lichtmenge die durch das Objektiv fällt - Schärfentiefe	(Objektiveinstellung)

Die Blende am Objektiv ist die hinterste Öffnung des Objektivs - also zwischen Linsensatz der Optik und Bildsensor.

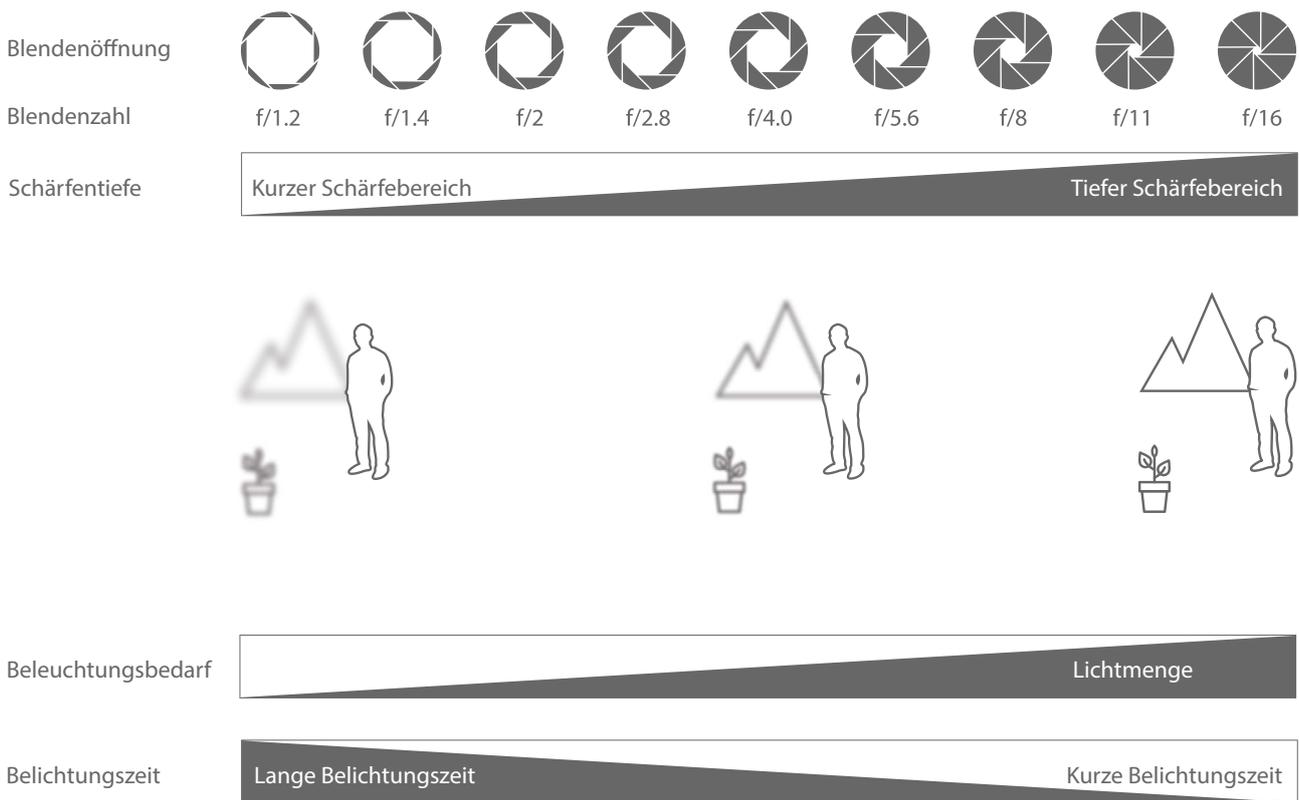
Während die Belichtungszeit der Kamera den Zeitraum definiert, wie lange ein einzelnes Bild belichtet wird, bestimmt die Blendenöffnung des Objektivs die Lichtmenge die auf den Bildsensor der Kamera fällt. Die maximale Blendenöffnung eines Objektivs charakterisiert dessen Lichtempfindlichkeit. Die Blendenzahlen sind international genormt und an jedem Objektiv sichtbar. Je kleiner die kleinste Blendenzahl, je lichtstärker ist das Objektiv.

Die Blendenöffnung hat unmittelbaren Einfluss auf die **Schärfentiefe** (auch Tiefenschärfe genannt).

Die Tiefenschärfe beschreibt die räumliche Tiefe in der Abbildung, die durch das Objektiv scharf abgebildet wird.

Je größer die gewählte Blende, sprich je kleiner die physikalische Blendenöffnung, je größer die Schärfentiefe.

Die Schärfentiefe variiert mit der Brennweite des Objektivs, dem Öffnungswert und der Aufnahmedistanz.



In der Praxis sollte immer für eine ausreichende Objektbeleuchtung gesorgt werden, damit alle vorgenannten Parameter optimal definiert und die Fähigkeiten des Kamerasystems maximal ausgenutzt werden können.

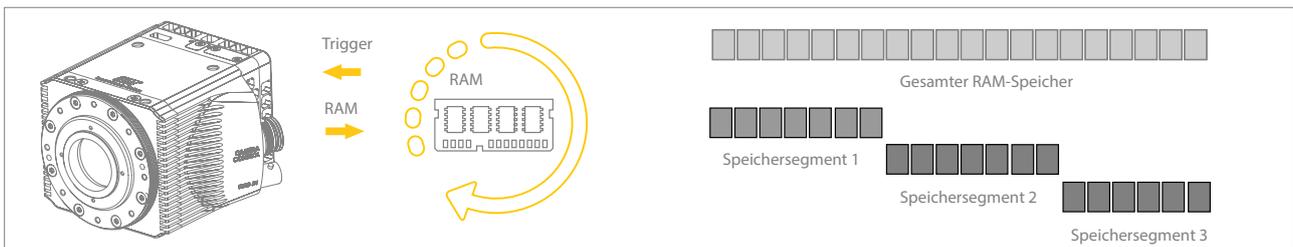
Bei Objekten mit geringer räumlicher Tiefe können auch bei schwacher Beleuchtung sehr gute Ergebnisse mit offenerer Blende erzielt werden, da hier die Schärfentiefe vernachlässigt werden kann, aber dennoch eine kurze Belichtungszeit über den höheren Lichteinfall der offenen Blende realisiert werden kann.

6.0 Speichermanagement & Trigger

Moderne Hochgeschwindigkeits-Kerasysteme verfügen über unterschiedlichste Speichertechnologien. Die Aufgabe von Highspeed-Video ist es einen sehr schnellen und zeitlich kurzen Vorgang bzw. ein Ereignis aufzuzeichnen. Ist der Start dieses Ereignisses zeitlich nicht bestimmbar bietet das Speichermanagement des Ringspeichers und die Trigger-Position alle Mittel um dieses Ereignis zu erfassen.

Die klassische Hochgeschwindigkeits-Kamera verfügt über einen internen RAM-Speicher. Die Bilddaten werden kameraintern vom Bild-Sensor direkt in diesen flüchtigen Speicher übertragen. Dieser Speicher ist als Ringspeicher definiert. Er wird also in einer Endlosschleife mit Bilddaten belegt, wobei ältere durch neue Daten ersetzt werden. Dem Kamerasystem wird über ein s.g. Trigger-Signal mitgeteilt, wann die Bildaufzeichnung erfolgen soll und welche Bilddaten archiviert werden.

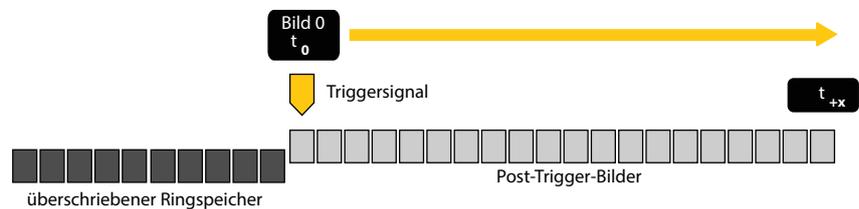
Wahlweise kann der gesamte physikalische Bildspeicher für eine Aufnahme aktiviert werden, oder der Speicher wird in Segmente beliebiger Größe (im Rahmen der physikalischen Gegebenheiten) unterteilt um mehrerer Aufnahmen zu ermöglichen.



Nach der Aufzeichnung über dieses klassische Aufzeichnungsverfahren befinden sich die Bilddaten im flüchtigen RAM-Speicher der Kamera oder des Kontrollrechners (bei RAM-Streaming-Systemen, Folgeseite). Vor dem Ausschalten der Kamera müssen die Bilddaten dauerhaft auf den Kontrollrechner archiviert werden, da sie sonst gelöscht werden.

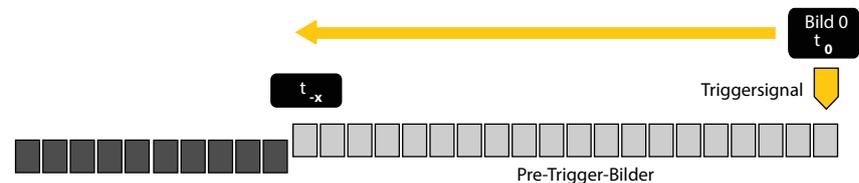
100% Post-Trigger

Der Speicher wird nach dem Signal einmal komplett neu mit Bilddaten belegt.



100% Pre-Trigger

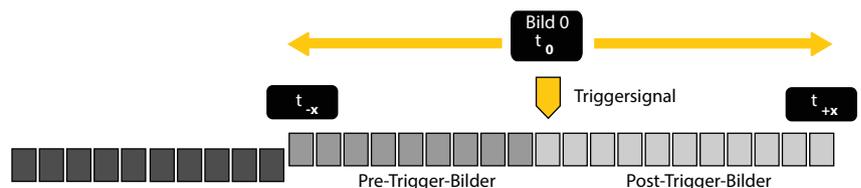
Die Aufnahme wird sofort gestoppt. Es bleiben 100% Bilddaten vor dem Triggersignal erhalten



Pre-/Post-Trigger

(z.B. Mittig bei 50%/50%)

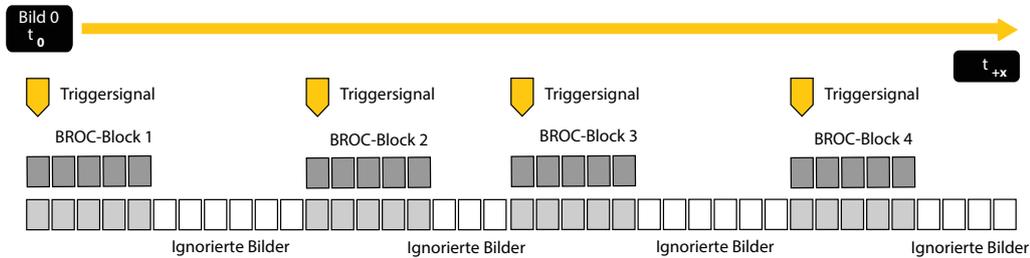
Es werden 50% Bilddaten vor dem Trigger behalten und 50% Bilder nach dem Trigger neu aufgezeichnet



Software-Trigger über Tastatur - Empfehlung 100% Pre-Trigger da nach dem Ereignis getriggert wird
Hardware-Trigger - Alle aufgeführten Pre-/Post-Verfahren und BROCC (sofern hardwareseitig unterstützt)

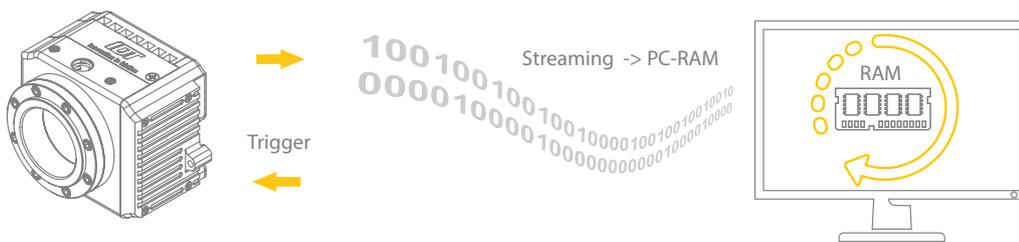
BROC-Verfahren (Mehrfach-Trigger RAM-Bildspeicher)

BROC (Burst-Record-On-Command) ist eine Sonderfunktion über die der Bildspeicher optimal genutzt wird. Je Triggersignal wird nur eine feste Anzahl von Einzelbildern in der gewählten Geschwindigkeit in FPS aufgezeichnet. Der Bildspeicher wird nur für bestimmte Vorgänge genutzt wobei uninteressante Vorgänge ausgeschlossen werden. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Speicherblöcken kann unregelmäßig sein und wird rein über das Trigger-Signal bestimmt. Die vorgenannten Möglichkeiten über die Trigger-Position mit Pre-/Post-Einstellungen sind mit BROC kombinierbar.



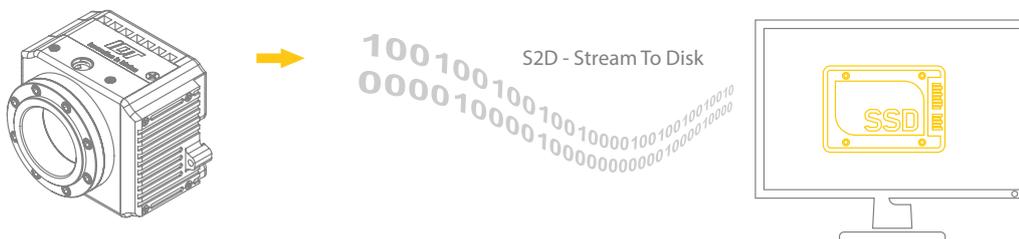
Highspeed-Streaming-Kamerasysteme

Neben den klassische Hochgeschwindigkeits-Kamerasystem mit internem RAM-Speicher setzen sich immer mehr Streaming-systeme durch. Diese übertragen die Bilddaten als Datenstream direkt in den RAM-Speicher eines externen Kontrollrechners. Aufzeichnungsgeschwindigkeiten und Datendurchsatz sind dabei sehr stark von der verwendeten Kommunikationsschnittstelle abhängig. Die maximale Aufnahmezeit ist dabei vom RAM-Ausbau des Rechners abhängig.

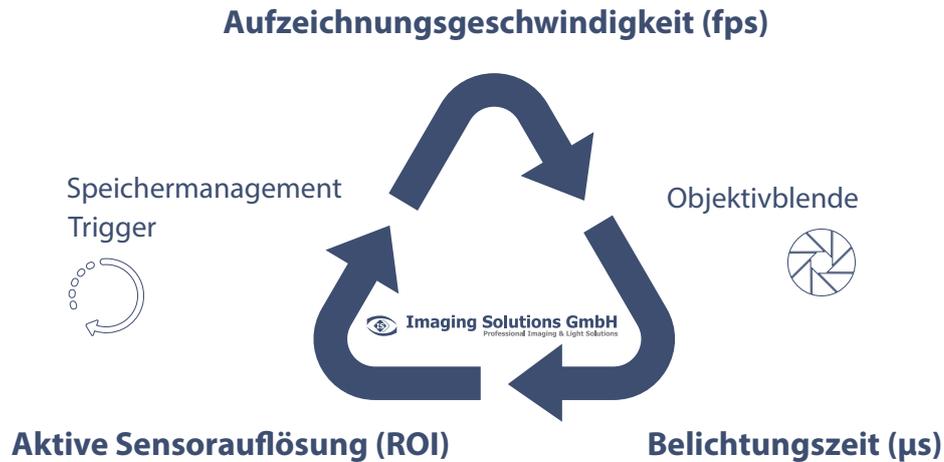


S2D - Streaming To Disk

Bei diesem Verfahren werden die Bilddaten als Datenstream direkt auf den SSD-Speicher eines externen Kontrollrechners übertragen. Über diese Methode sind extreme Langzeitaufnahmen möglich. Die Aufzeichnungsgeschwindigkeiten und dabei mögliche Auflösung ist auch hier stark von der Performance des Kontrollrechners abhängig. Ein Pre-/Post-Trigger oder BROC ist bei diesem Verfahren nicht möglich.



7.0 Zusammenfassung als täglicher Workflow



1

Aufzeichnungsgeschwindigkeit (FPS)
Objektbezogen zwischen 1-3 x Objektgeschwindigkeit (cm/s)

2

Aktive Sensorauflösung (ROI):
Bei Bedarf zwecks höherer Aufzeichnungsgeschwindigkeiten (fps) oder längerer Aufnahmezeiten. Das kleinste zu beobachtende Detail im Gesamtbildinhalt sollte mit 4-6 Pixel aufgelöst werden.

3

Belichtungszeit (µs):
Möglichst kurze Belichtungszeit wählen - Ausreichend Beleuchtung an das Objekt führen. Bei der optimalen Belichtungszeit beträgt die Objektbewegung im Bildinhalt unter 2 Pixel.

$$\text{Belichtungszeit } t_{\text{opt}} (\mu\text{s}) = \frac{2 \times \text{Bildausschnitt (m)} \times 10^6}{\text{Objektgeschwindigkeit (m/s)} \times \text{ROI (horizontal oder vertikal)}}$$

4

Objektivblende / Schärfentiefe:
Blendenöffnung im Zusammenspiel mit der Belichtungszeit (µs) optimal für die benötigte Schärfentiefe wählen.

5

Speichermanagement & Trigger:
Aufnahmeverfahren, Speichermanagement und Trigger-Position passend zur Anwendung wählen. Software-Trigger über Tastatur - Empfehlung 100% Pre-Trigger da nach dem Ereignis getriggert wird
Hardware-Trigger - Alle aufgeführten Pre-/Post-Verfahren und BROCC (sofern hardwareseitig unterstützt)