



Corona in Zeitlupe (1)

von den Herausforderungen, die Bewegungen kleiner Organismen zu erfassen

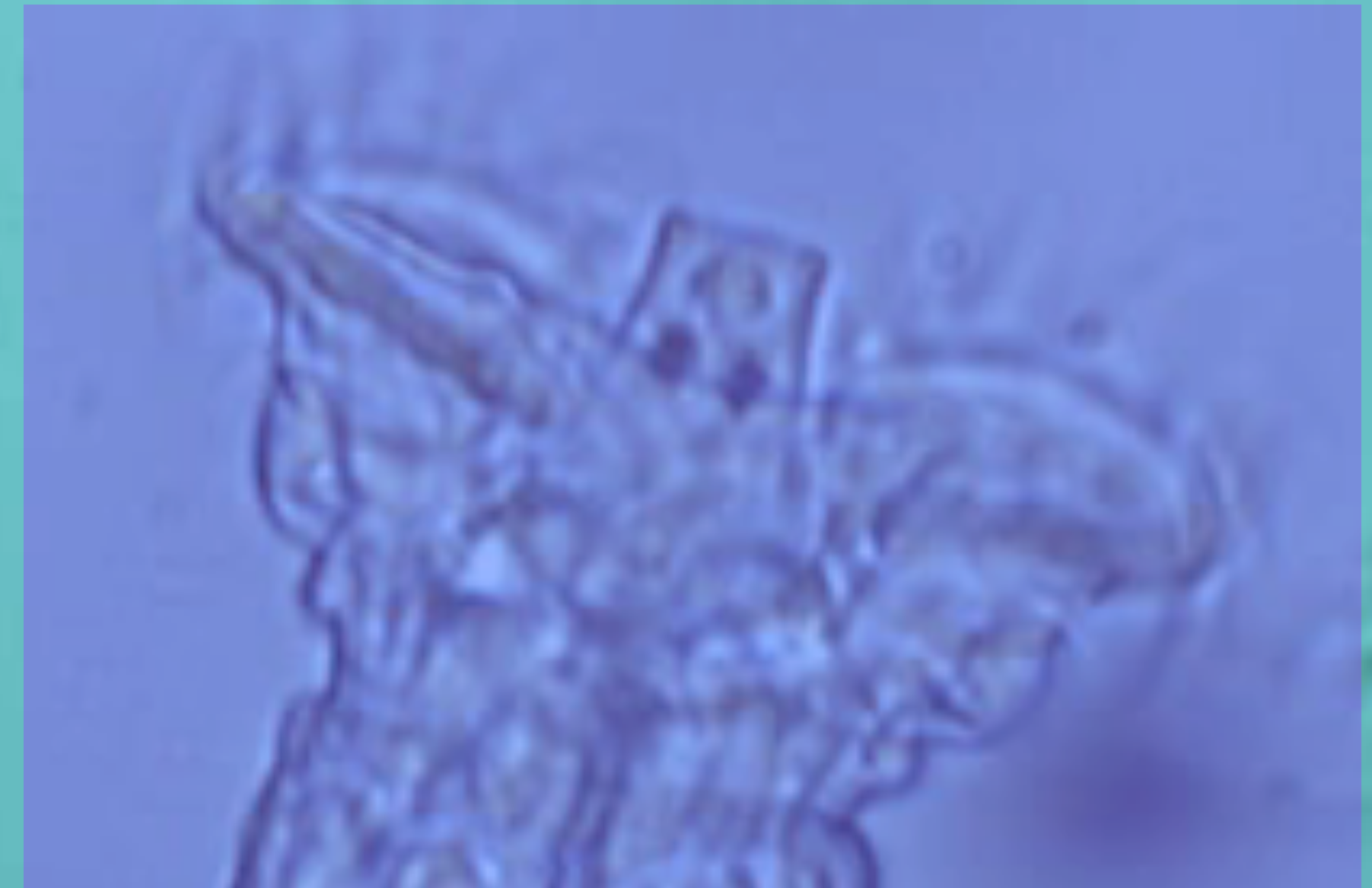
Das Räderorgan (**Corona**) ist einzigartig im Tierreich. Dessen Bewegung verdanken die Rädertiere ihren Namen



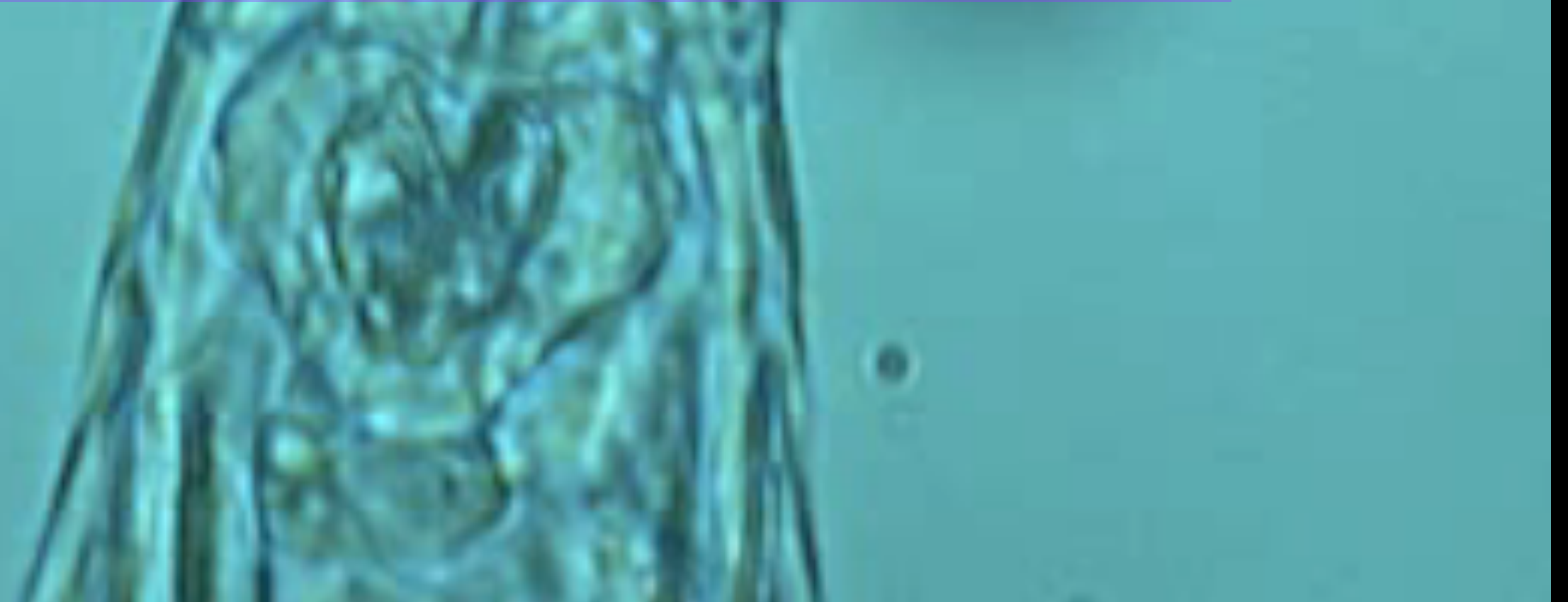
Vogeltränke



Philodina acuticornis

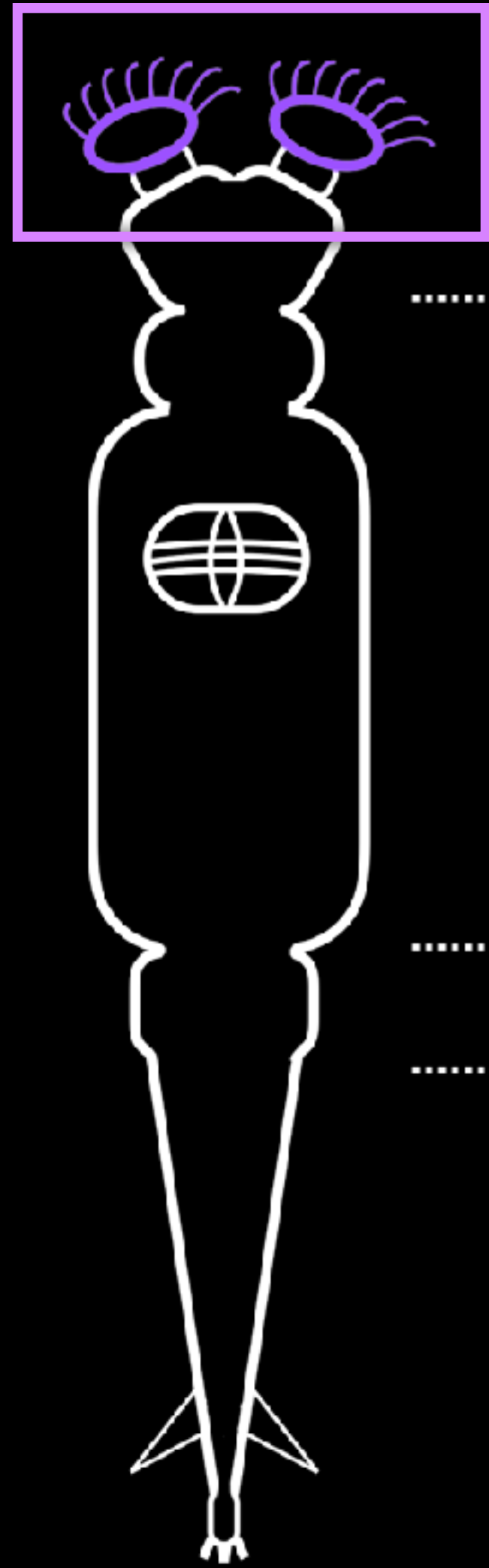


Rotaria macrura



Webcam (640 x 480 pixel; ca. 2001)

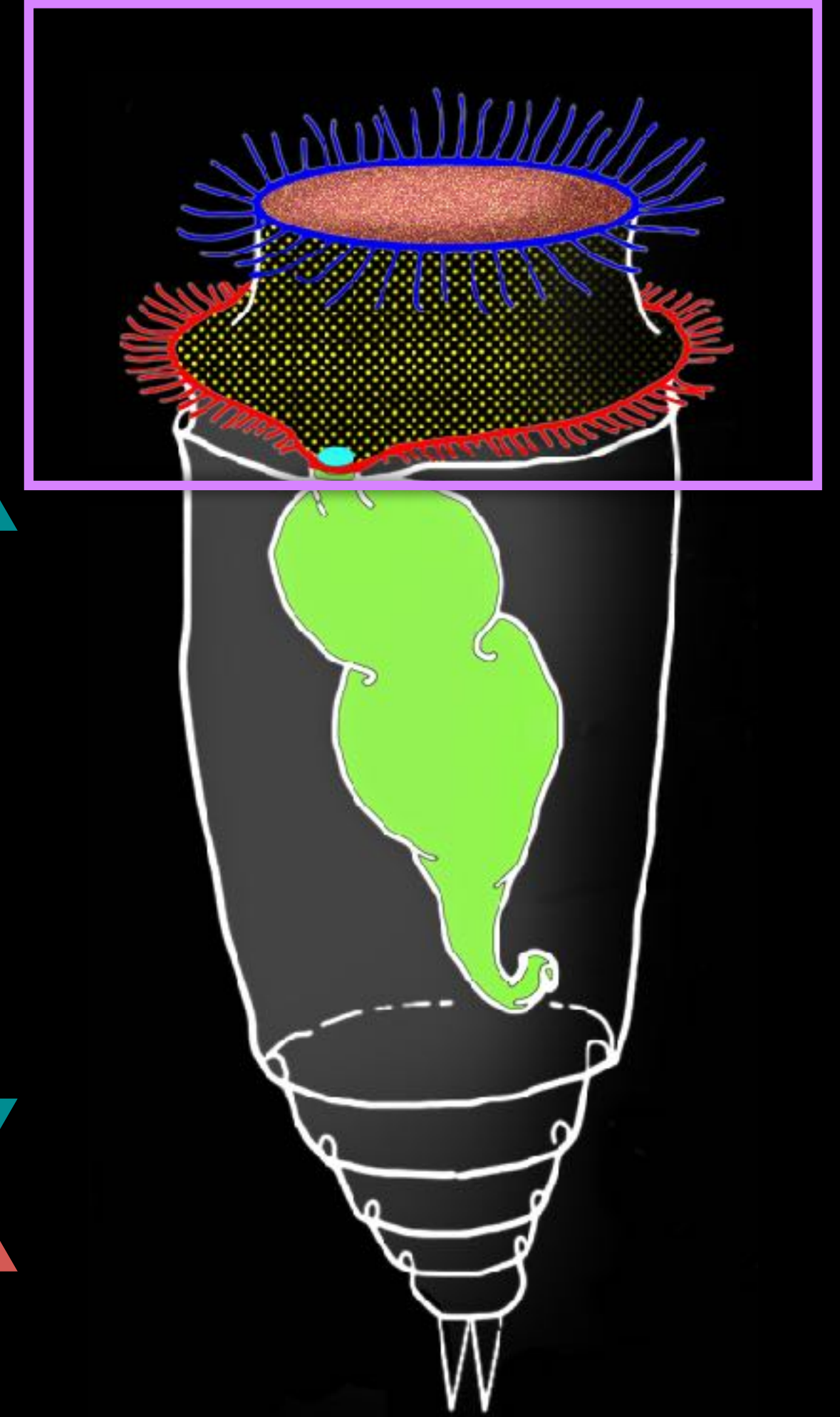
Die Corona ist ein Ring mit Cilien, der sich am Vorderteil des Rädertiers befindet



Kopf

Rumpf

Fuß



nach Wallace (2002)

Allgemeines Schema eines Rädertiers

Für die Erfassung von Bewegungen sind Zeitlupenaufnahmen hilfreich.

„Zeitlupe“ bedeutet hier: die Bildfrequenz der Aufnahmen ist möglichst hoch

Aufnahme	Wiedergabe	Verlangsamung
300 fps	24 fps	12 x
180 fps	24 fps	≈ 7 x

und nicht sowas



Die Räderbewegung hat 2 Funktionen:

1. Fortbewegung



Brachionus sp.

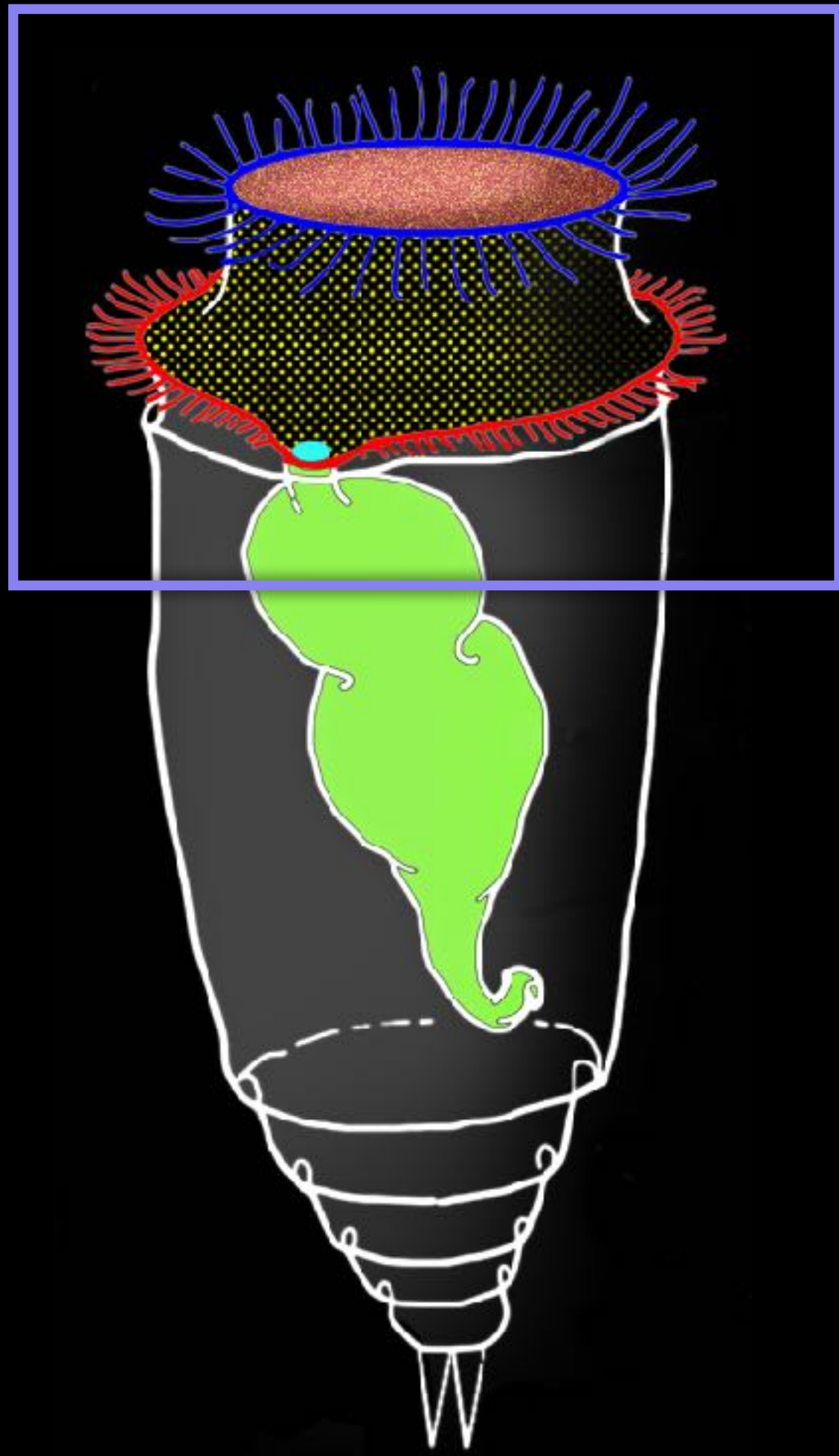
2. Nahrungsaufnahme



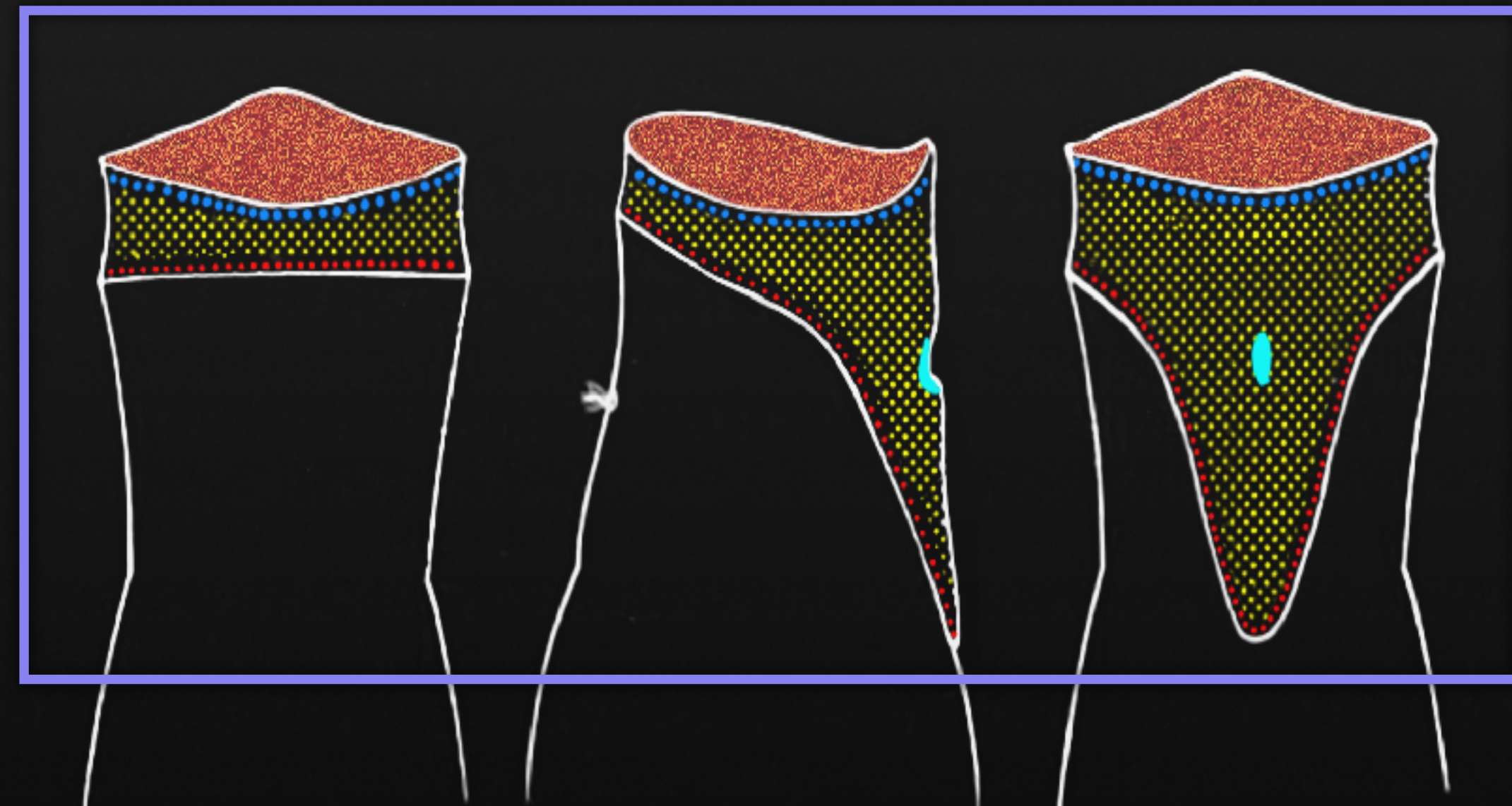
Rotaria macrura

Kauer

Formal besteht die **Corona** aus 4 funktionalen Teilen:



Klassische Darstellung der Corona:

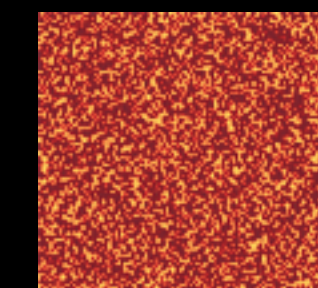


Rücken-
ansicht

Seiten-
ansicht

Bauch-
ansicht

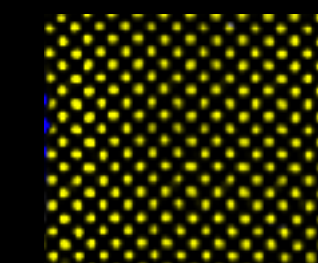
nach Beauchamp (1907)



Apikalfeld



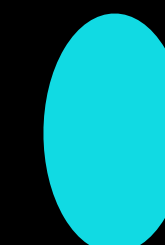
Trochus



circumapikales
Band



Cingulum



Mund

Vielfalt der Rädertier-Bauplans: Corona

- Wie sah die Evolution des Räderorgans aus?
- Welchen Lebensraum besiedelte der Vorfahr der Rädertiere??



Der Eindruck eines sich drehenden Rades ist -selbstverständlich- eine optische Täuschung

Metachronie:

gleichartige, gerichtete Bewegung
einer Gruppe von Cilien
(oder Extremitäten),
die periodisch phasenverschoben
auftritt



7x langsamer



← gibt es auch bei terrestrischen Organismen

Um das natürliche Verhalten zu dokumentieren, müssen die Organismen in einer bestimmten Position sein

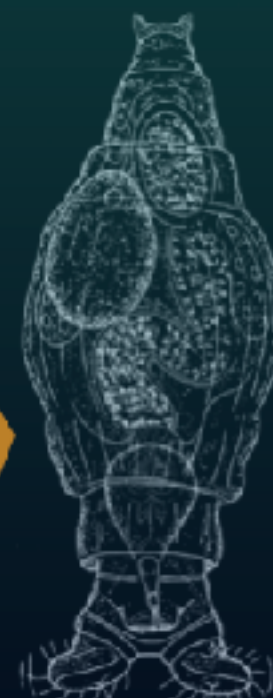
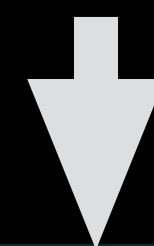
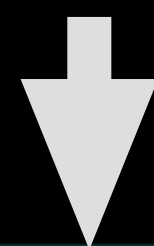


Mniobia magna; corona

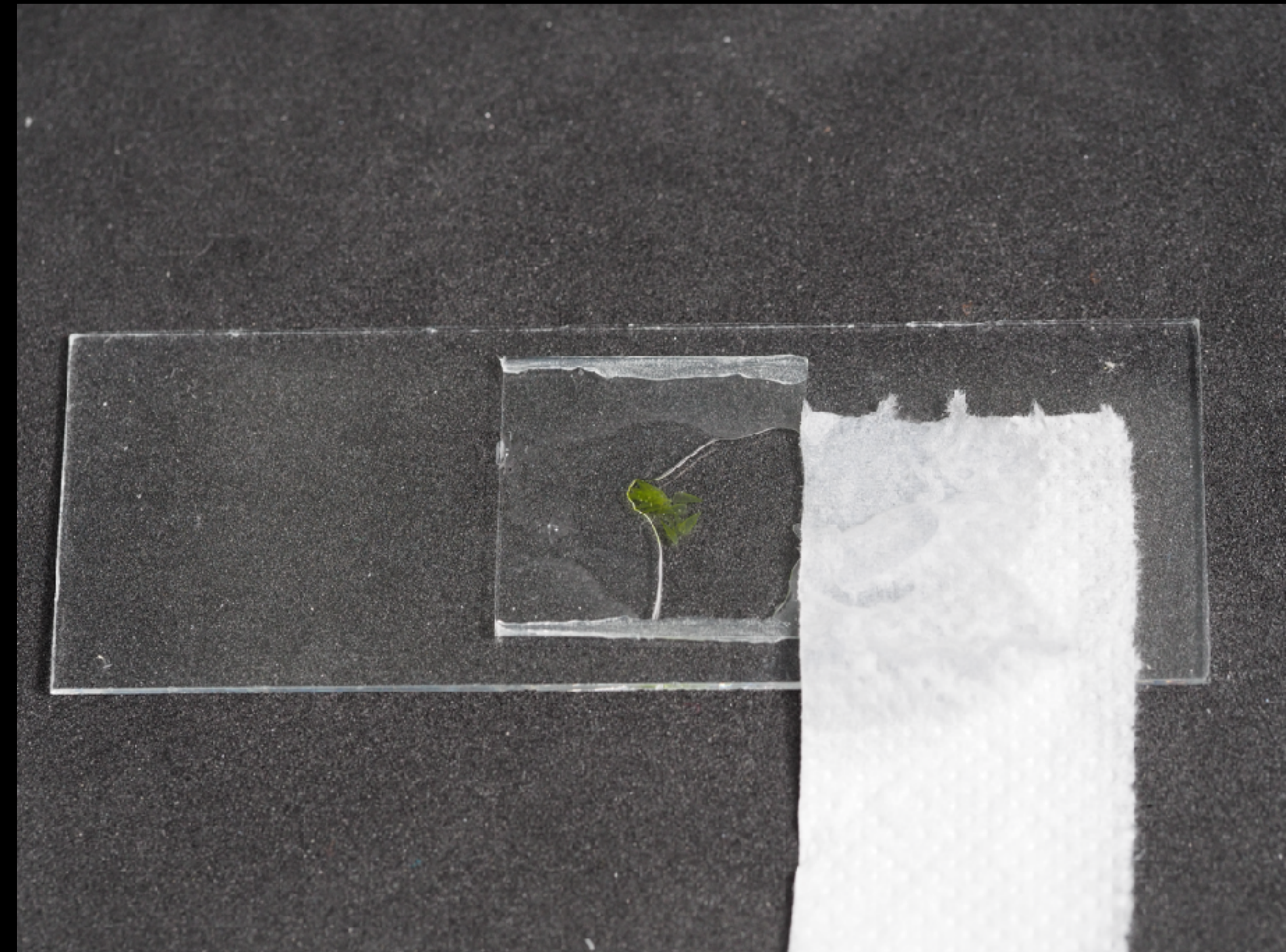
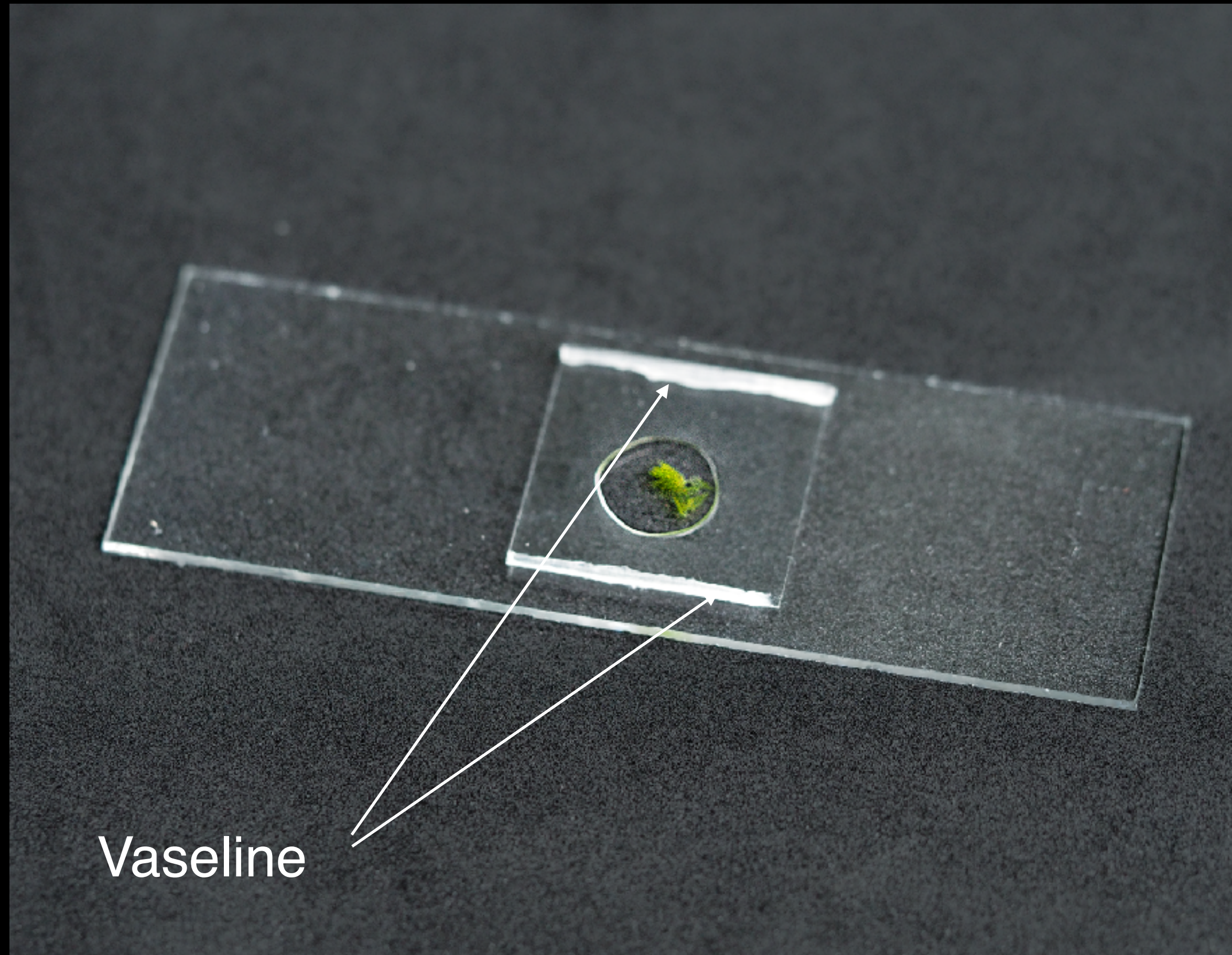
Das Objekt muss in dieser Position sein

unwahrscheinliche Position

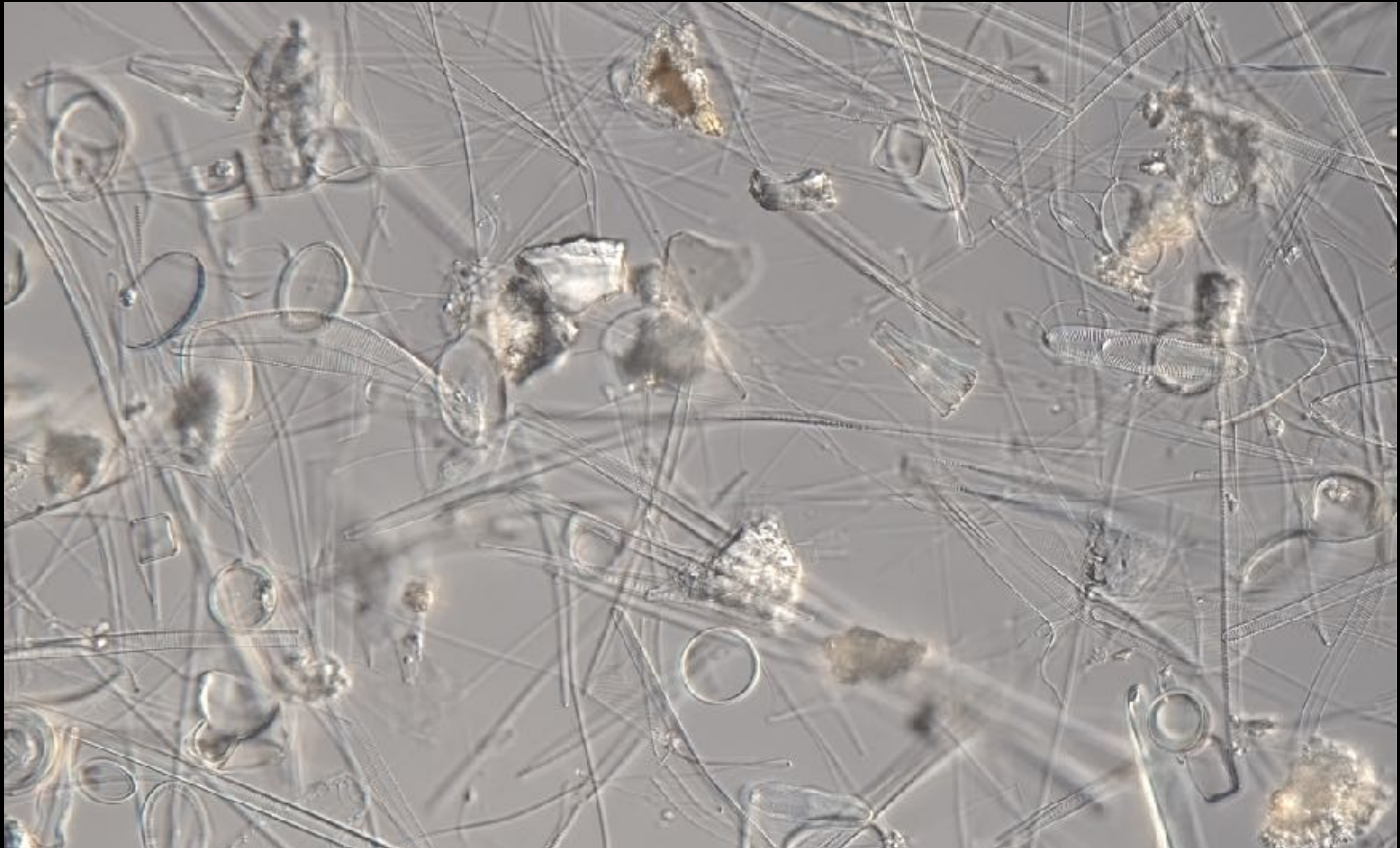
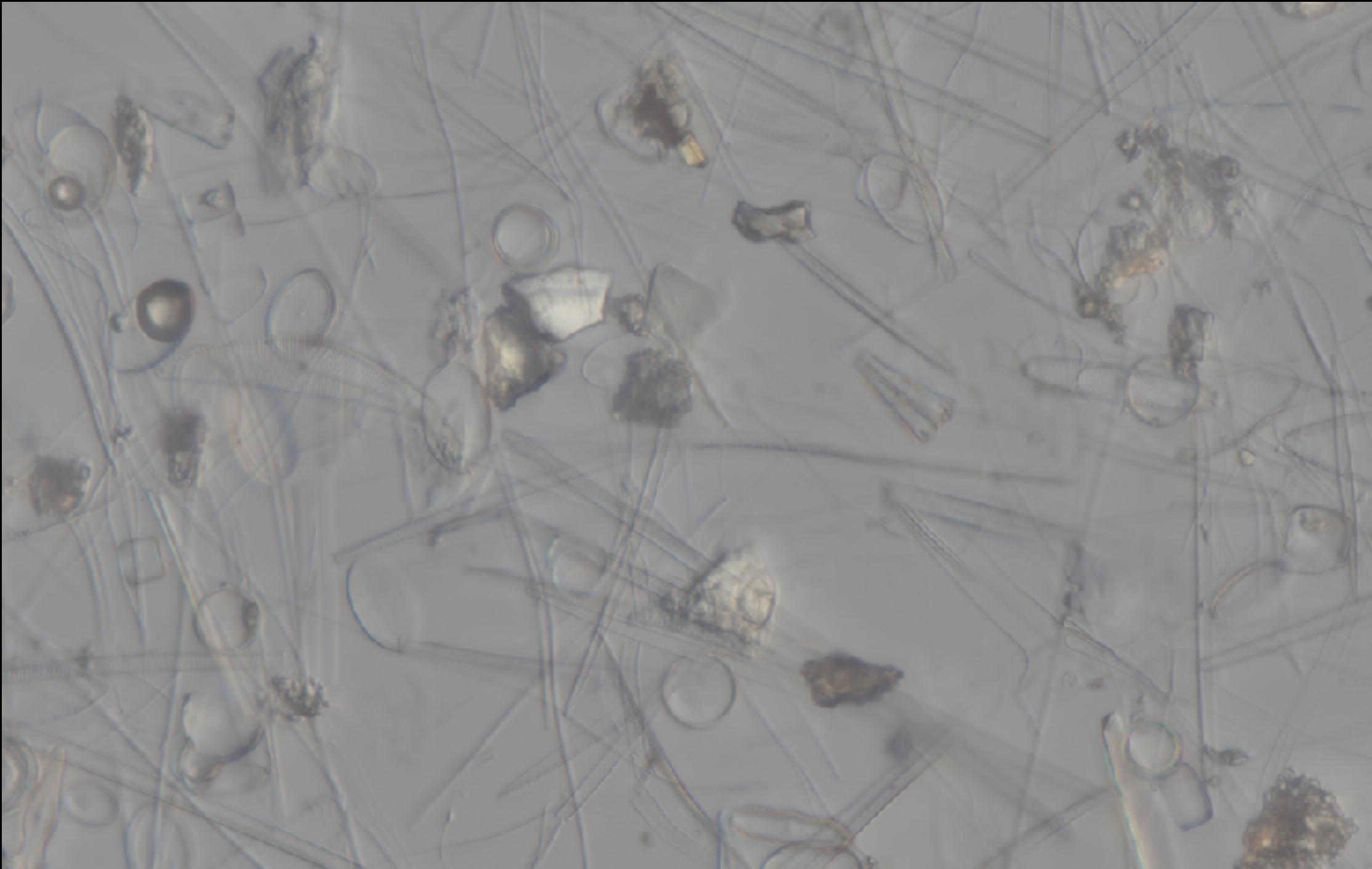
>>>>> Inversmikroskop nicht geeignet



Probenaufbereitung zur Untersuchung mit hoher Schichtdicke



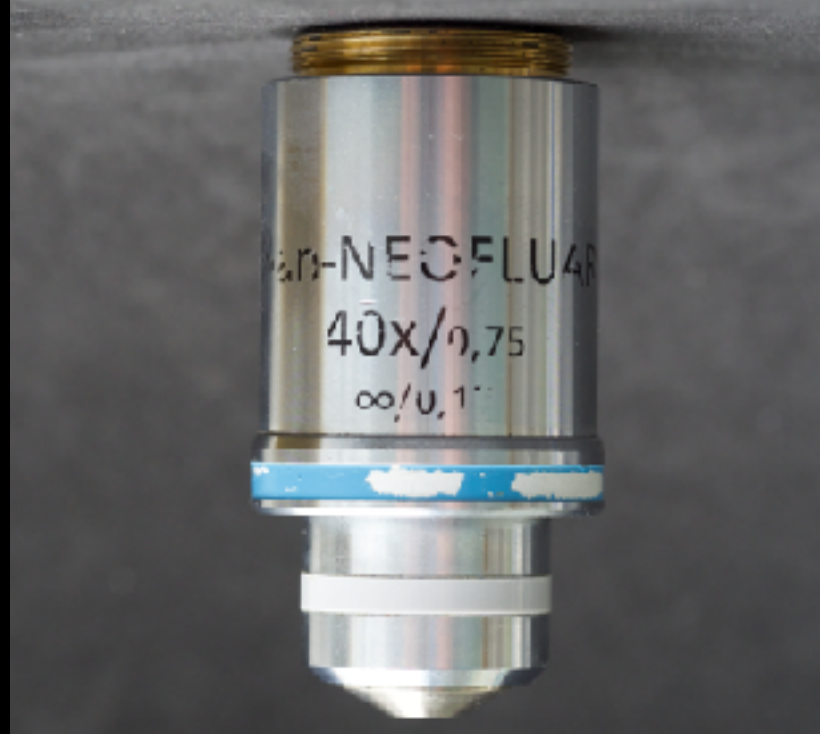
Manche Objektive sind für bestimmte Aufgaben besser geeignet



spherical aberration:

low contrast

Plan-Neofluar 40x/0.75



no spherical aberration:

high contrast

LD-C_Apo 40x/1.1



Deckglas

Schichtdicke \approx 0.5mm

Objektträger

Samples courtesy Dr. Ralf Nötzel, Germany

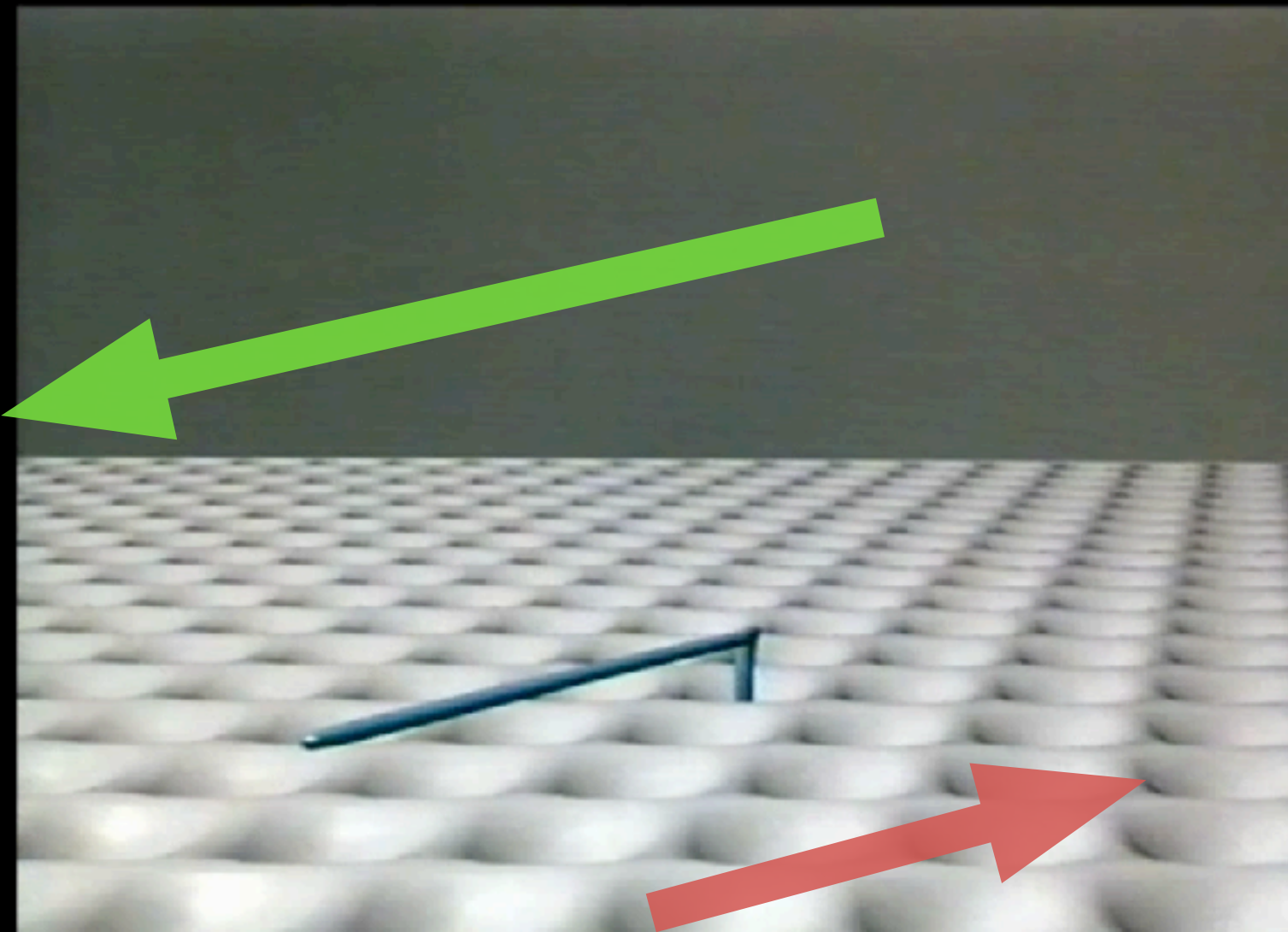
Die metachrone Koordination hat prinzipiell bei allen Organismen immer 2 Komponenten:

1. Schlagrichtung der Cilien mit:

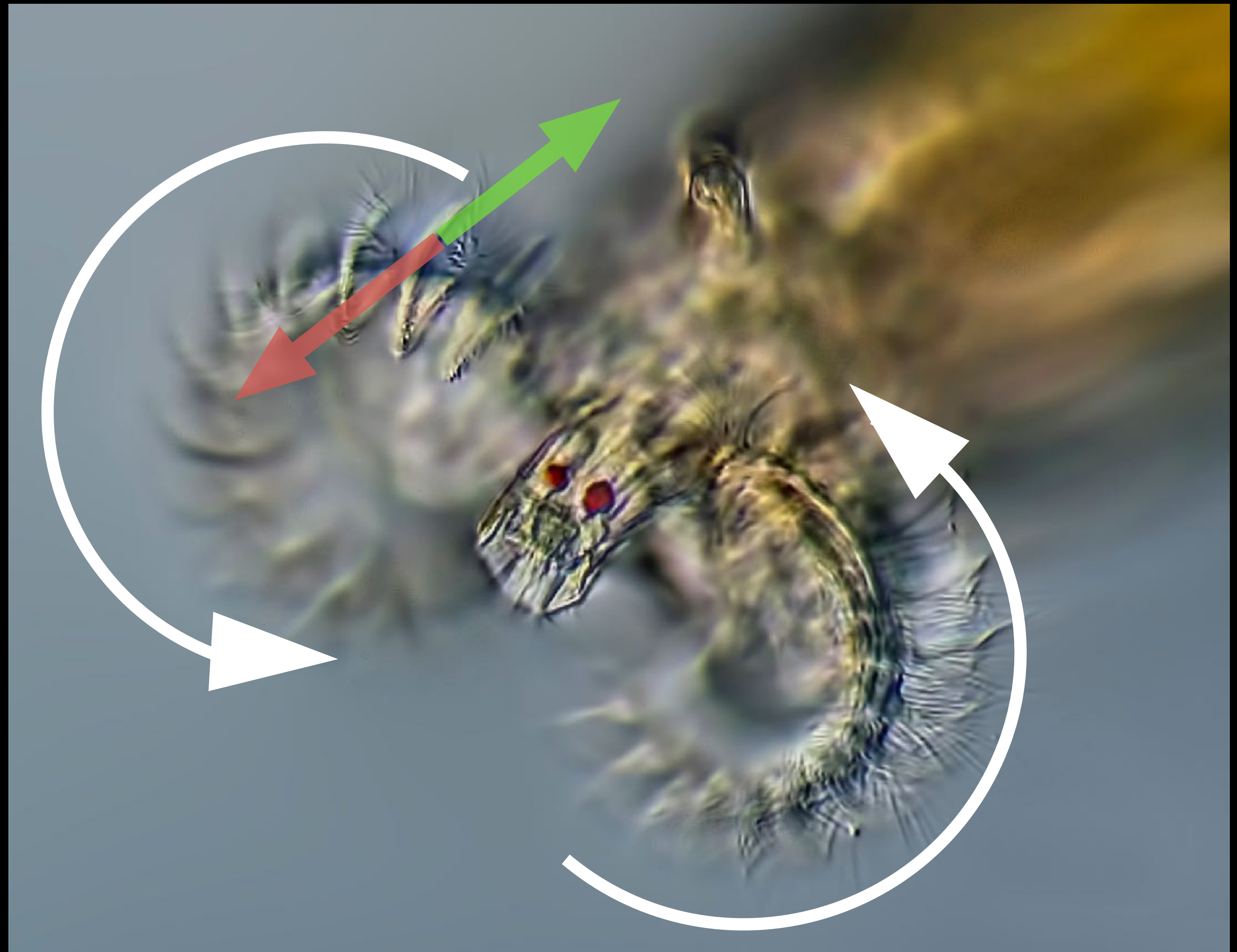
- effektivem Schlag 

- Rückholschlag 

2. Richtung der Wellenbewegung 



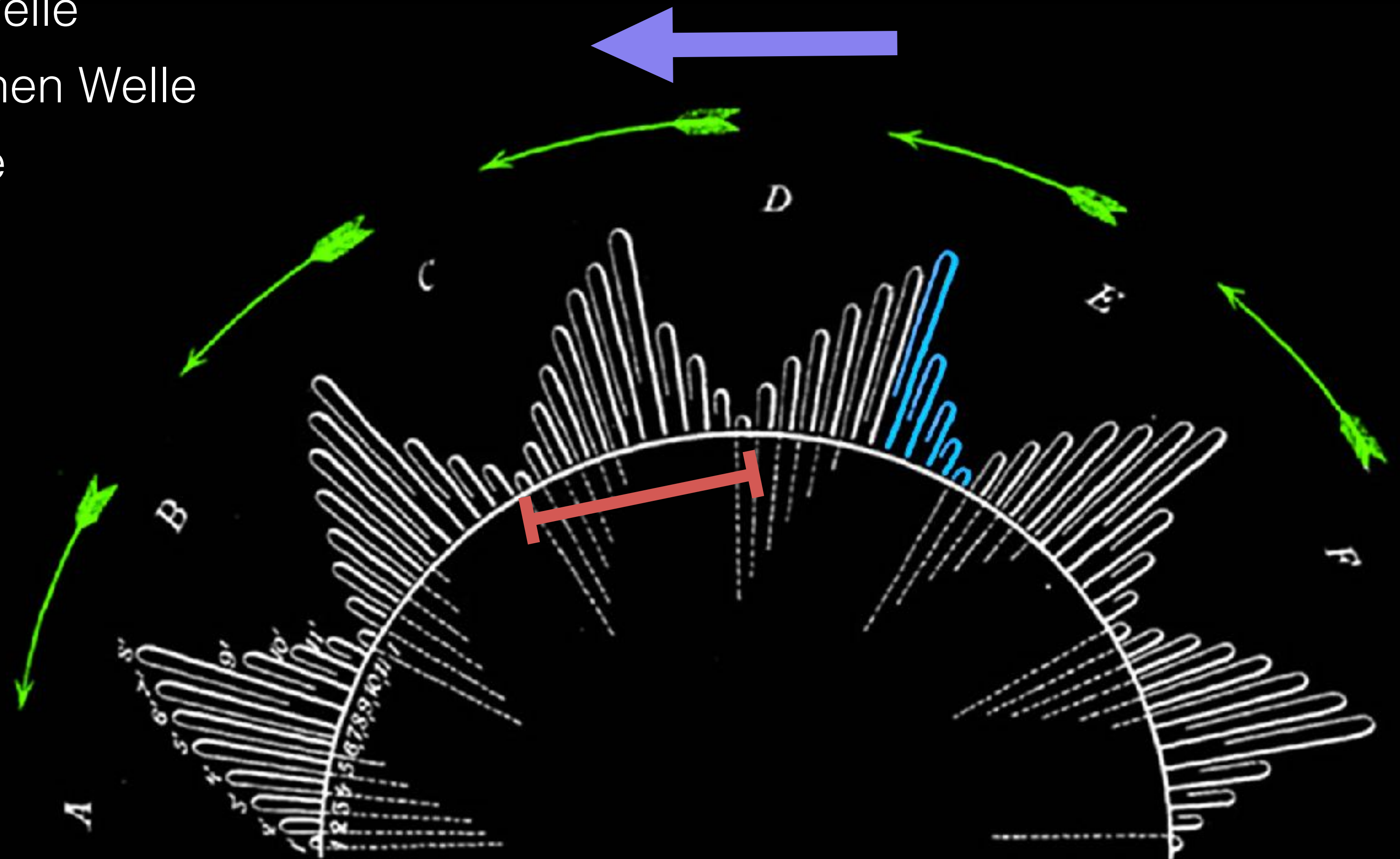
Video: Hausmann/ IWF



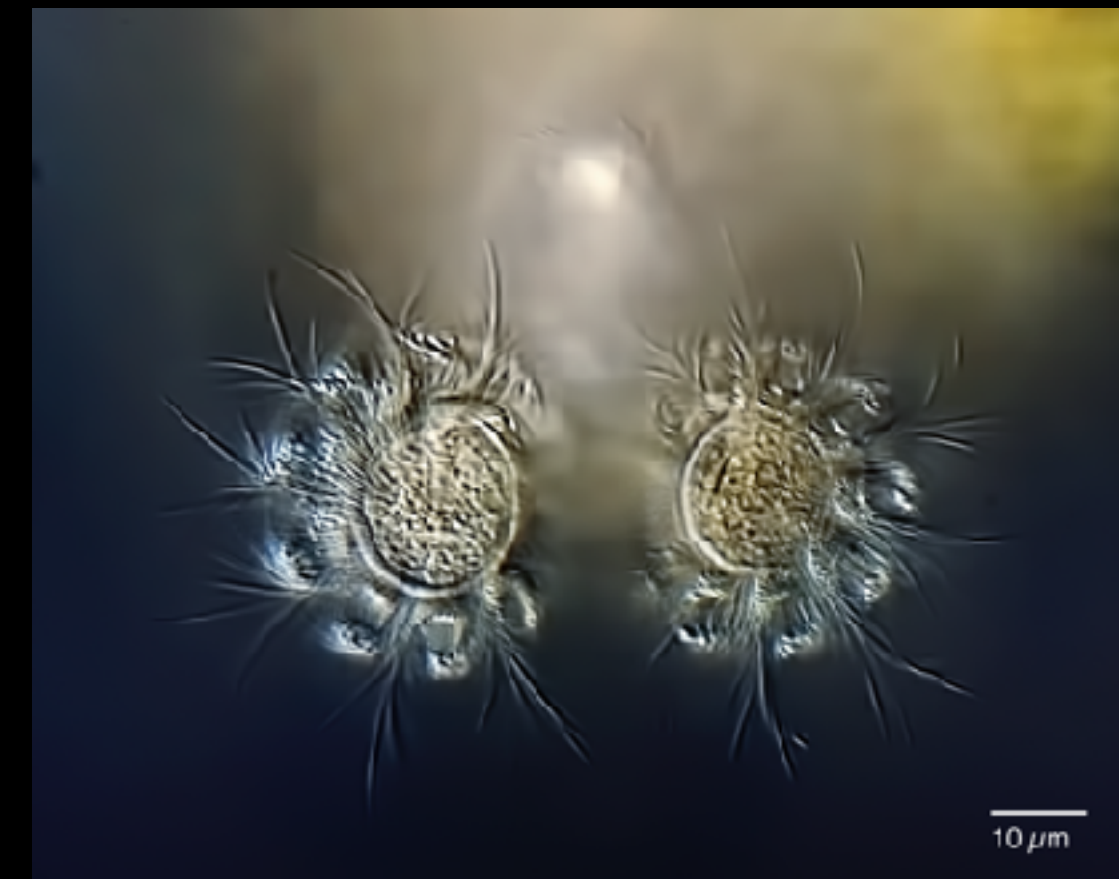
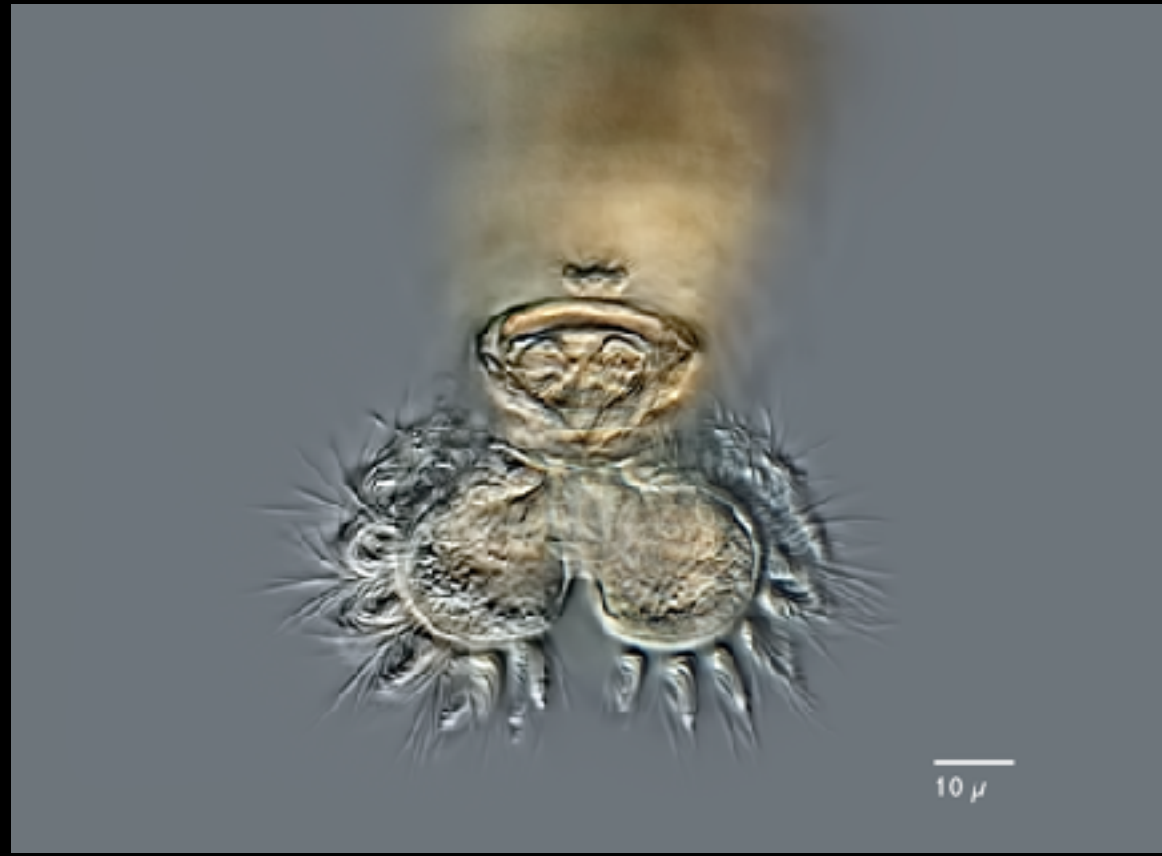
Rotaria macrura

Parameter der metachronen Wellenbewegung. Beispiel: Rädertier Mniobia

- **Schlagfrequenz** und **Schlagrichtung** der Cilien
- **Wellenlänge** der metachronen Welle
- **Geschwindigkeit** der metachronen Welle
- **Richtung** der metachronen Welle



Die **Moment**aufnahme zeigt immer ein charakteristisches Muster:



Alle Aufnahmen: bdelloide Rädertiere, Frontalansicht

Cilien und/ oder Flagellen kommen bei vielen Organismengruppen vor:



Stachelhäuter



Ringelwürmer



Strudelwürmer



Rippenquallen



Moose



Manteltiere



Xenacoelomorpha



Bauchhärlinge



Hohltiere



Pilze



Moostierchen



Hufeisenwürmer



Weichtiere



Schwämme

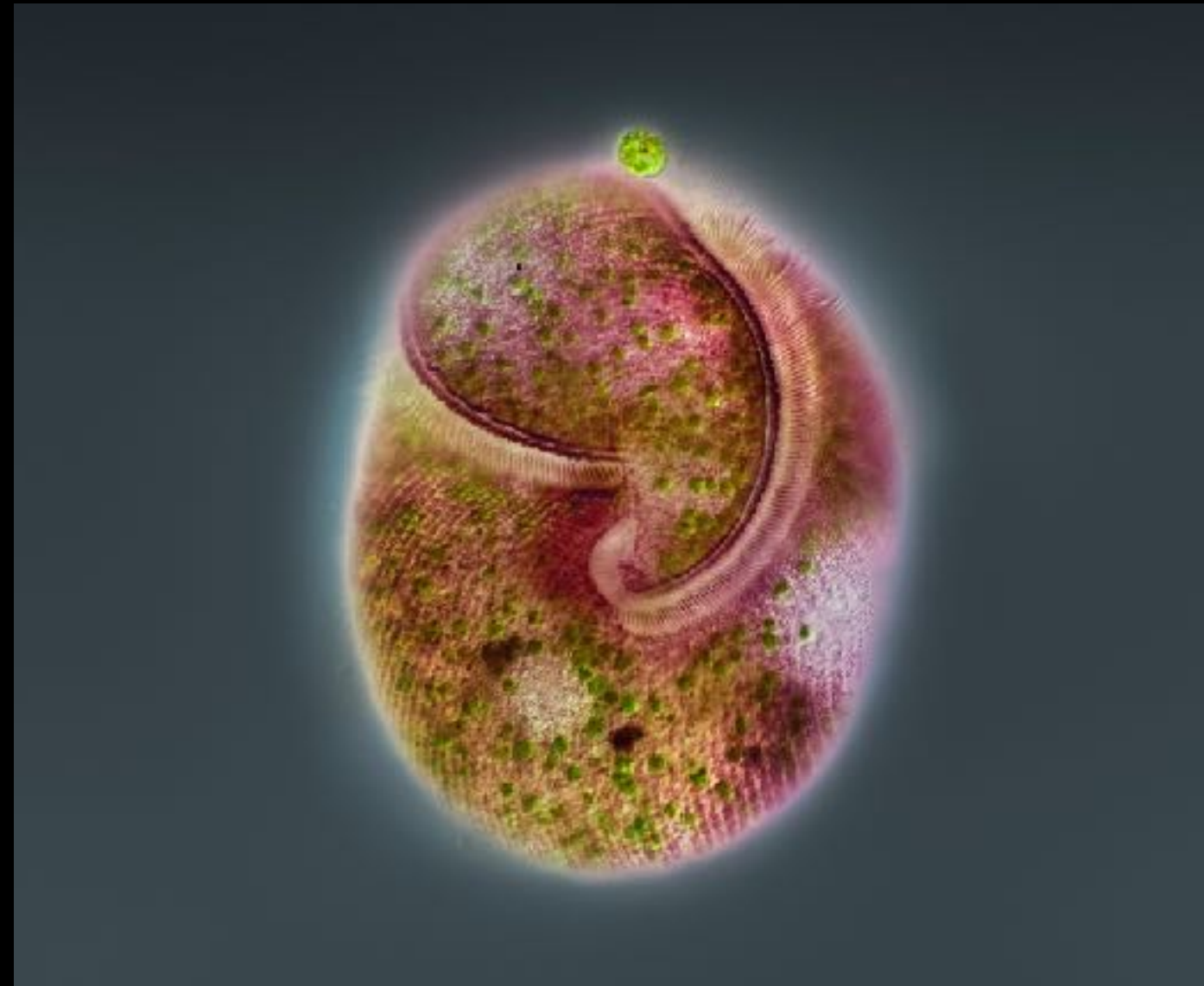


Algen

Die metachrone Cilienbewegung gibt es -selbstverständlich- auch bei Ciliaten:



Halteria



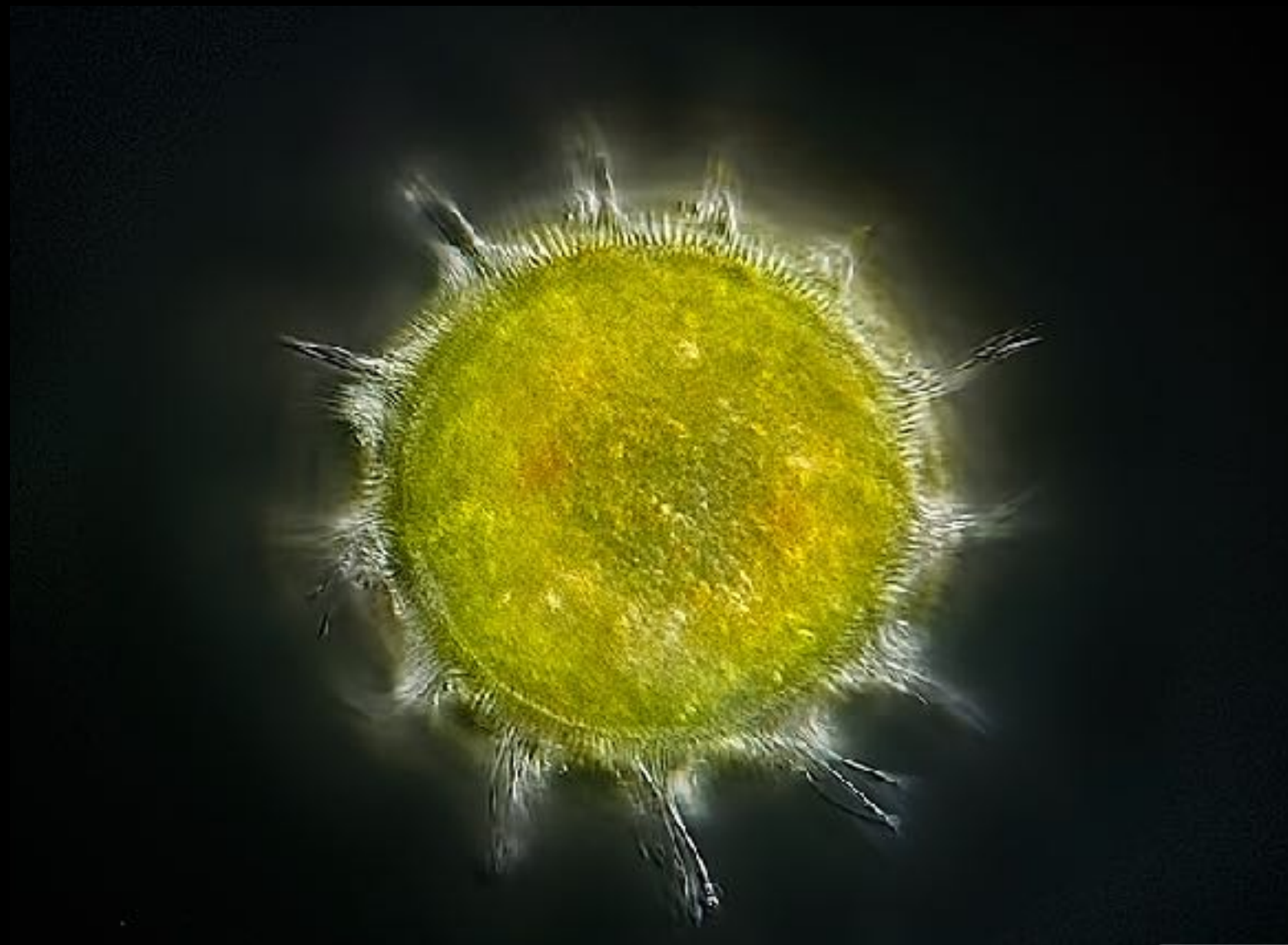
Stentor



Trichodina



Phacodinium



Cyclotrichium



Limnostrombidium

Basierend auf der Schlagrichtung werden bei der metachronen Cilienbewegung 2 Fälle unterschieden:

diaplektisch



Rotaria macrura

Schlagrichtung der Cilien m.o.w. **senkrecht** zur Wellenbewegung

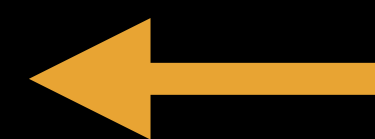
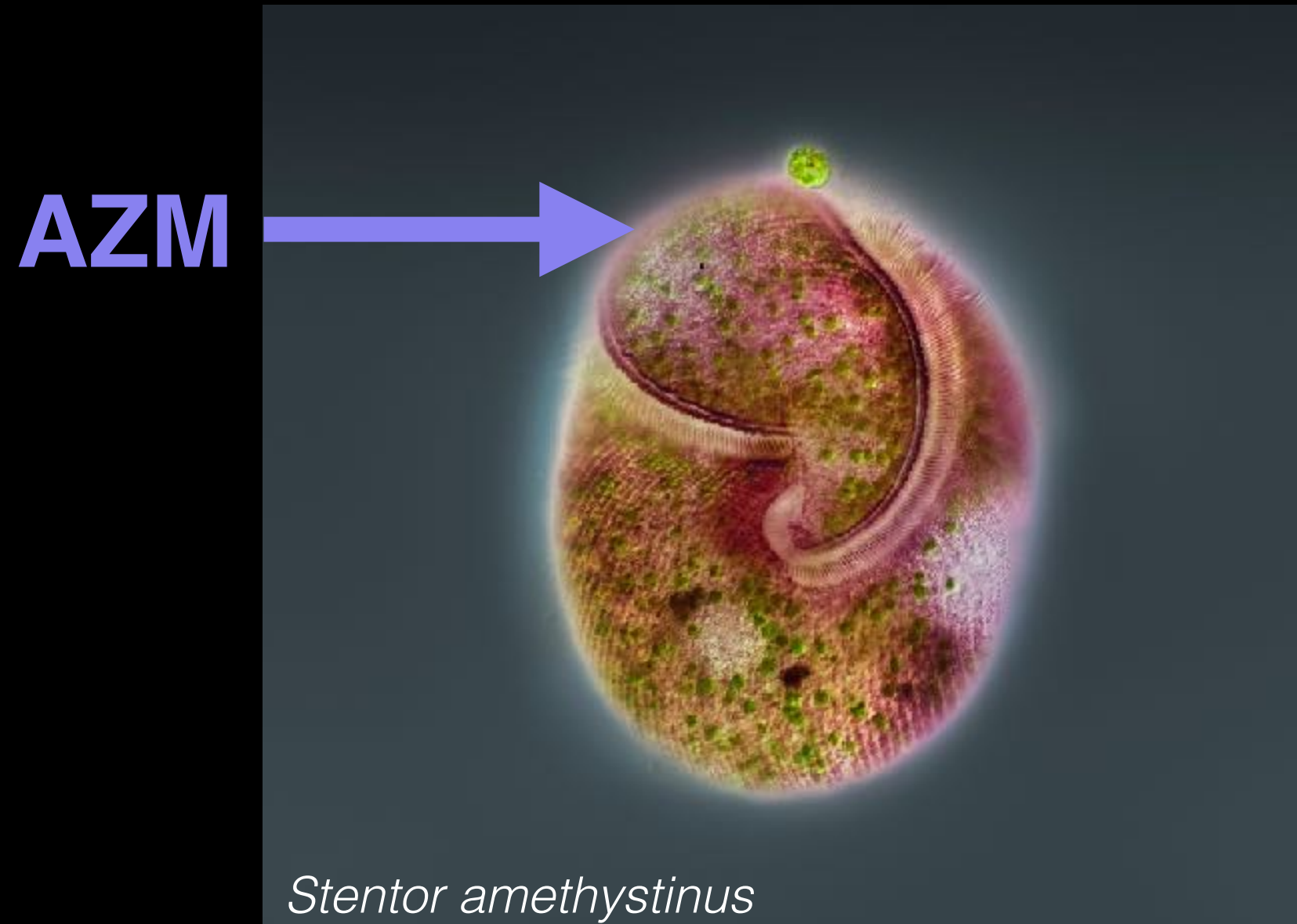
symplektisch



Epiclintes cf. ambiguus

Schlagrichtung der Cilien **parallel** zur Wellenbewegung

Die **Richtung** der metachronen Cilienbewegung macht keine Aussage zur Richtung der erzeugten Wasserbewegung und damit zur Funktion (>>>**Transport**)

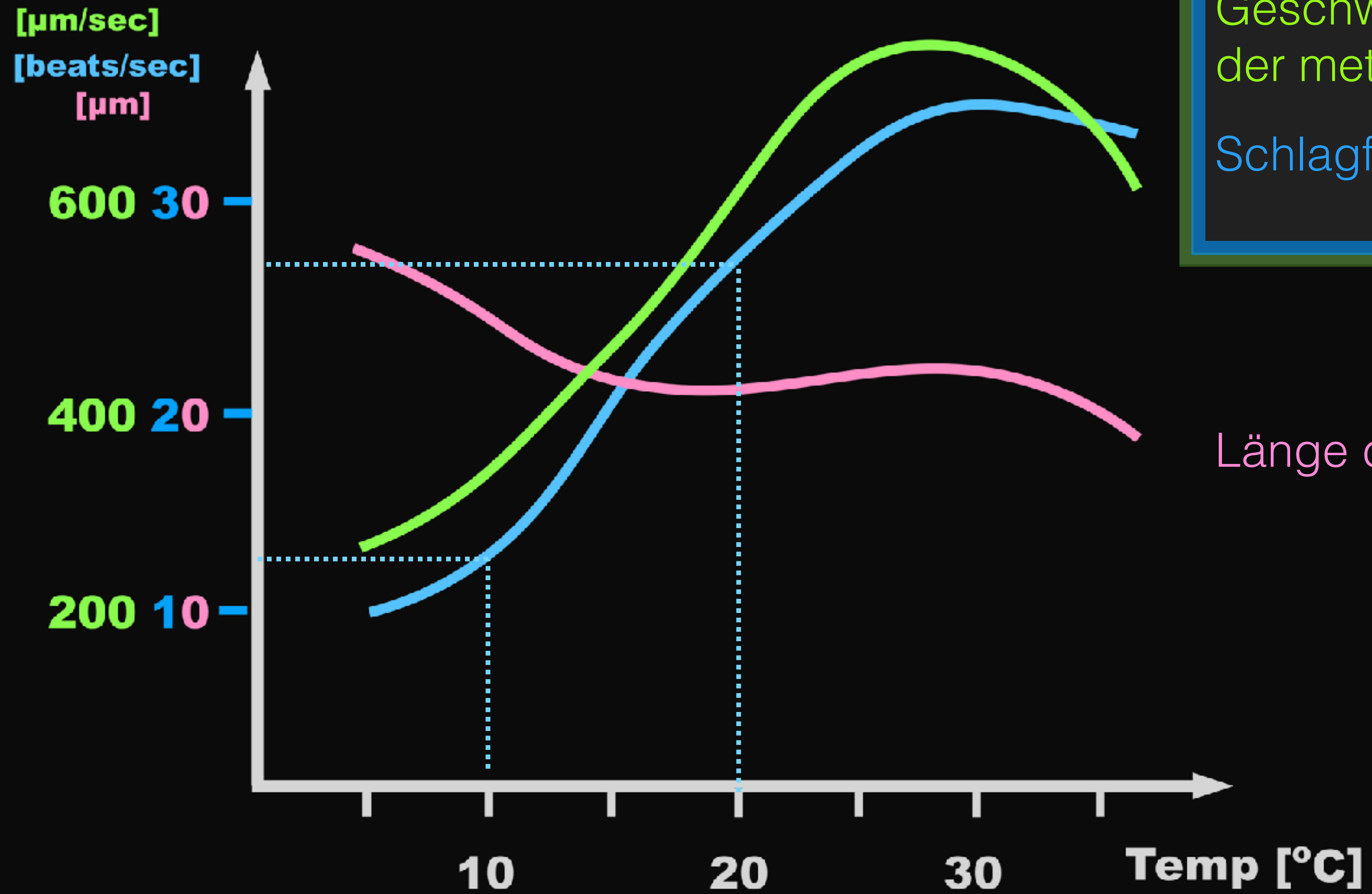


Transport erfolgt zum Mund



Richtung der metachronen Wellen

Das Trompeten“tier“ Stentor ist bezüglich der Metachronie sehr intensiv untersucht (Sleigh (1956)):



Geschwindigkeit
der metachronen Wellen

RGT- Regel !!!

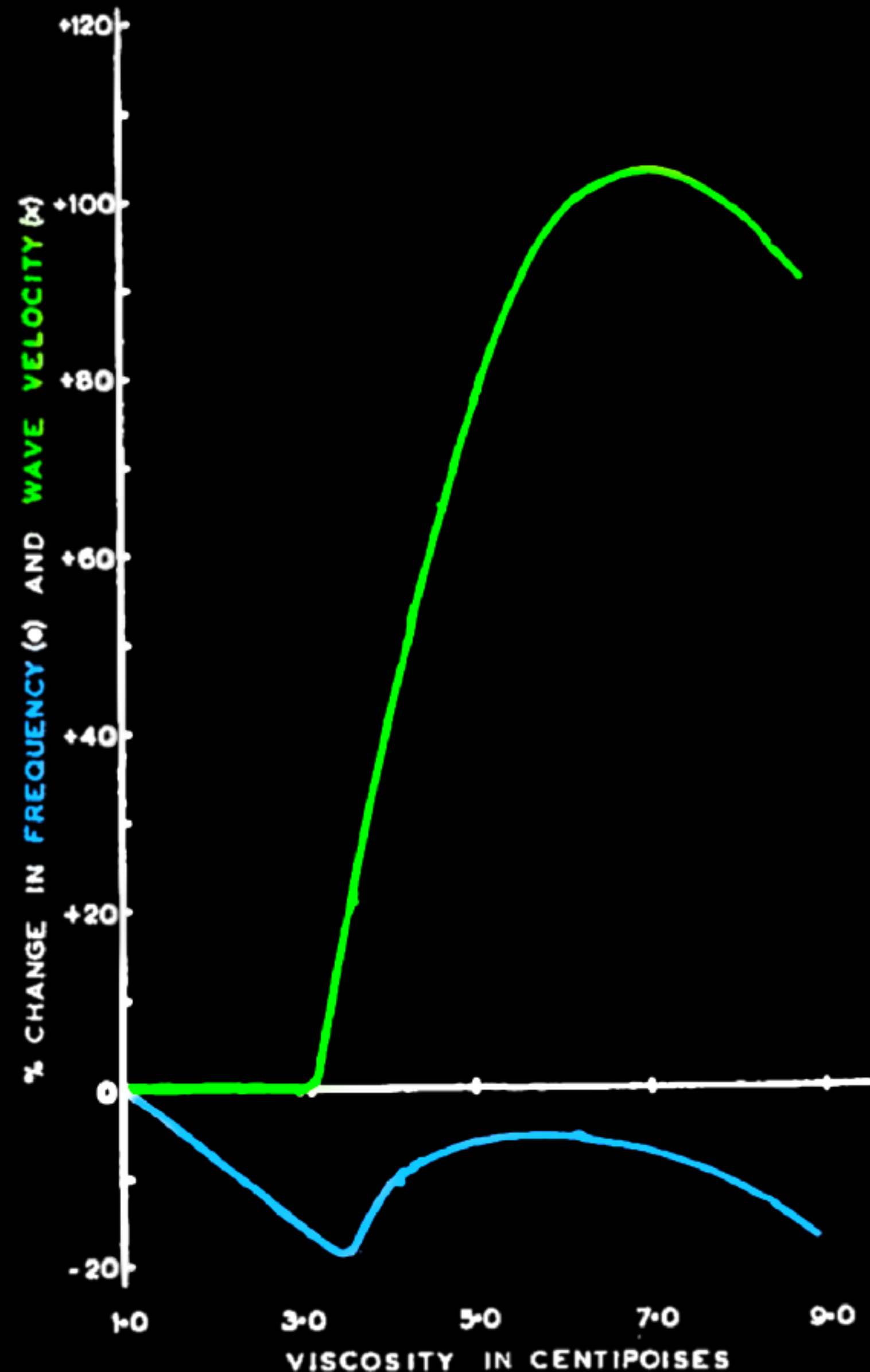
Schlagfrequenz der Cilien

Länge der metachronen Wellen

Table 1. The rate of coronal cilia movement in several rotifer genera.

Taxon	Beats. min ⁻¹	Organ
Gnesiotrocha	540-860	trochus
Pompholyx sulcata	550-660	
Filinia longiseta	540-820	
Hexarthra mira	640-860	
Conochilus unicornis	900-1050	
Pseudotrocha	750-1320	cingulum pseudotrochus
Proales daphnicola	860-1200	
Polyarthra	940-1320	
(remata, longiremis, vulgaris)		
Synchaeta pectinata	920-1300	
Asplanchna	900-1300	
(priodonta, herrieki, girodi)		
Euchlanis	750-1190	
(dilatata, incisa, deflexa)	600-830	pseudotrochus
Brachionus	960-1110	
(quadridentatus, angularis, ureeus)	510-780	
Keratella	960-1180	
(quadrata, cochlearis)		

Das unterschiedliche Verhalten der 2 Parameter in Abhängigkeit zur Viskosität macht deutlich, dass mehrere (= innere und äußere) Faktoren die metachrone Bewegung beeinflussen müssen



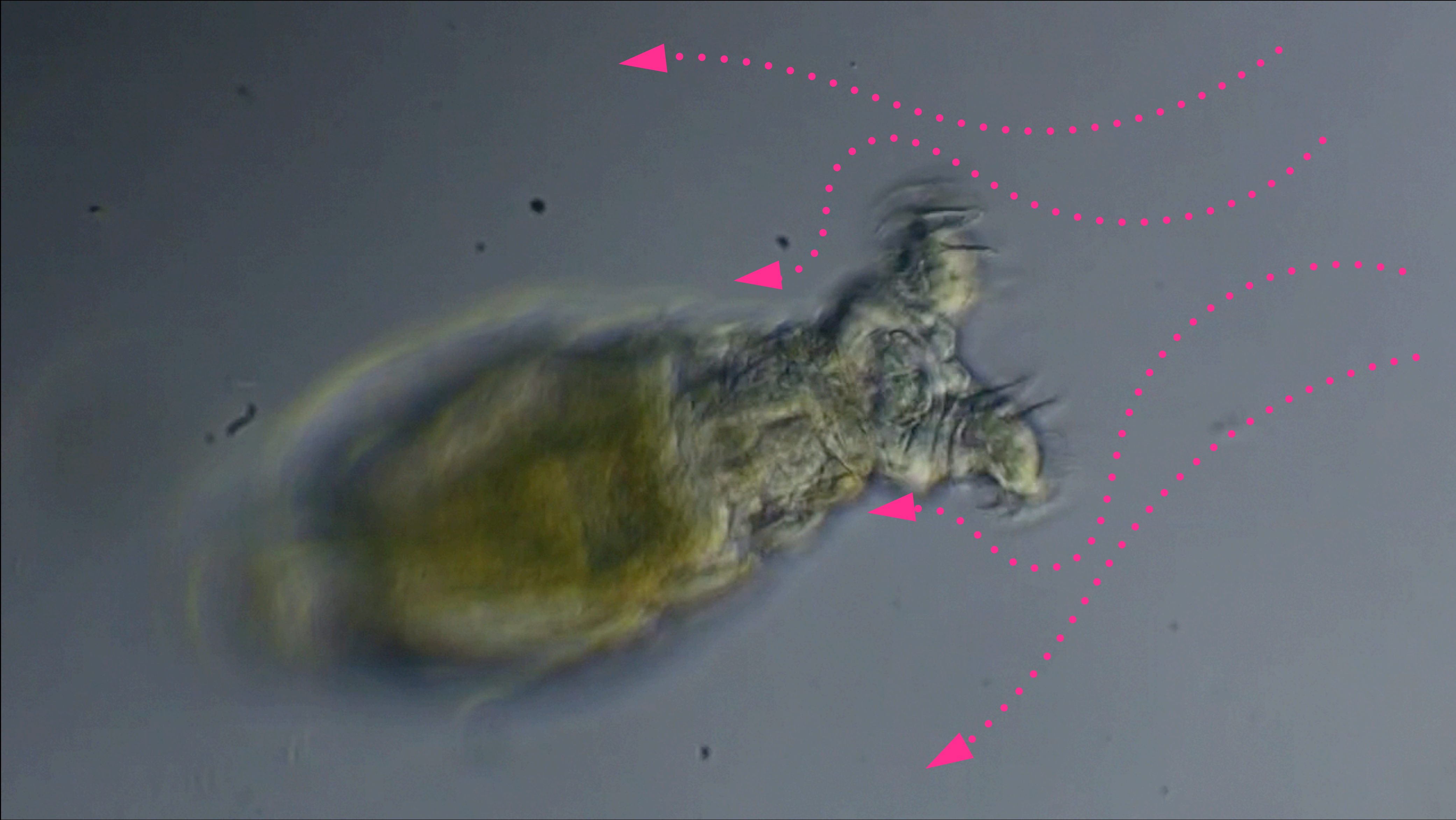
Geschwindigkeit der metachronen Wellen

Viskosität

(verändert mit Methylcellulose)

Schlagfrequenz der Cilien

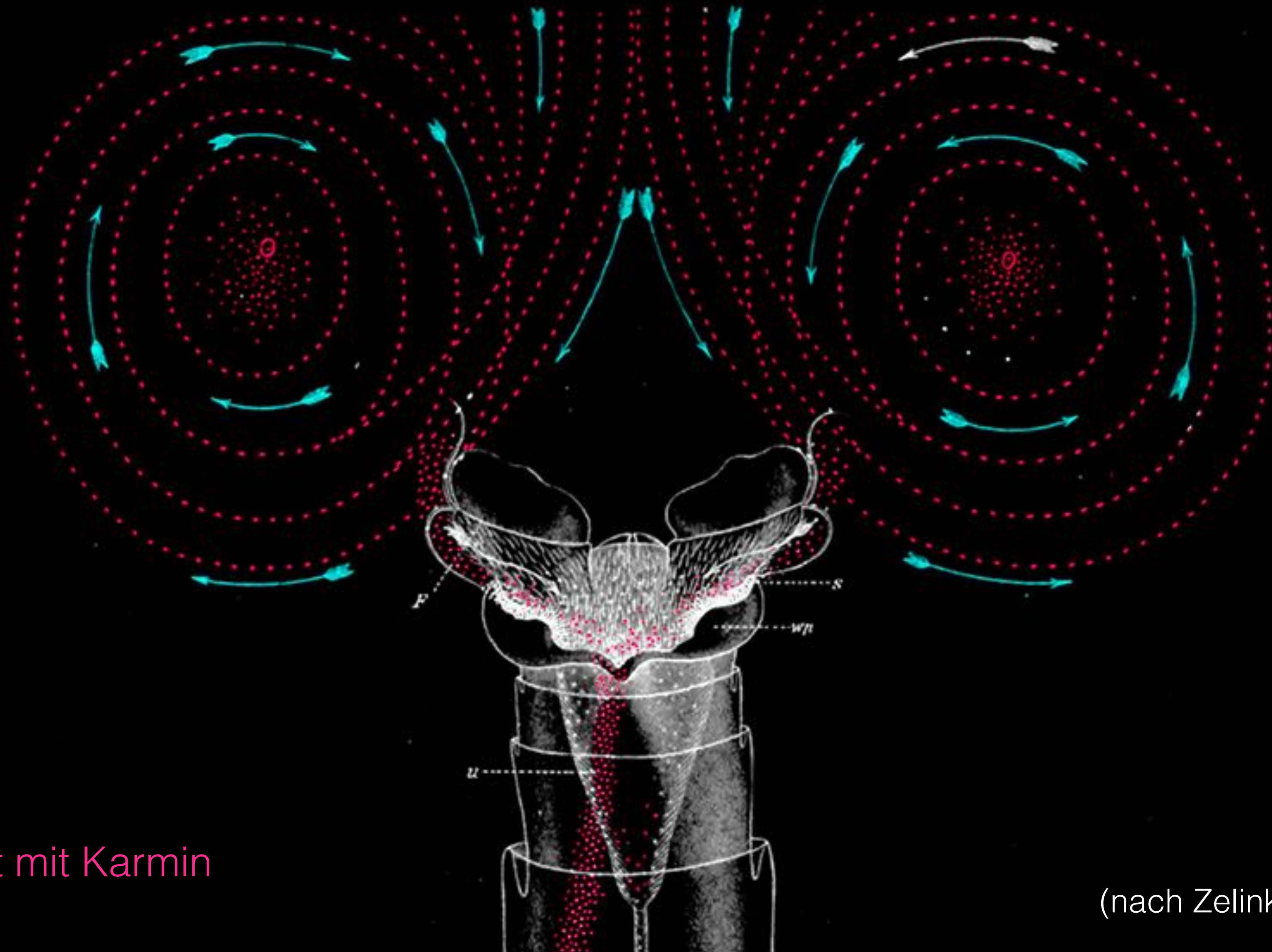
Der Cilienschlag bei vielen bdelloiden Rädertieren bewirkt einen **Wasserstrom**, welcher **spiegelsymmetrisch** verläuft.....



12x langsamer

Philodina plena

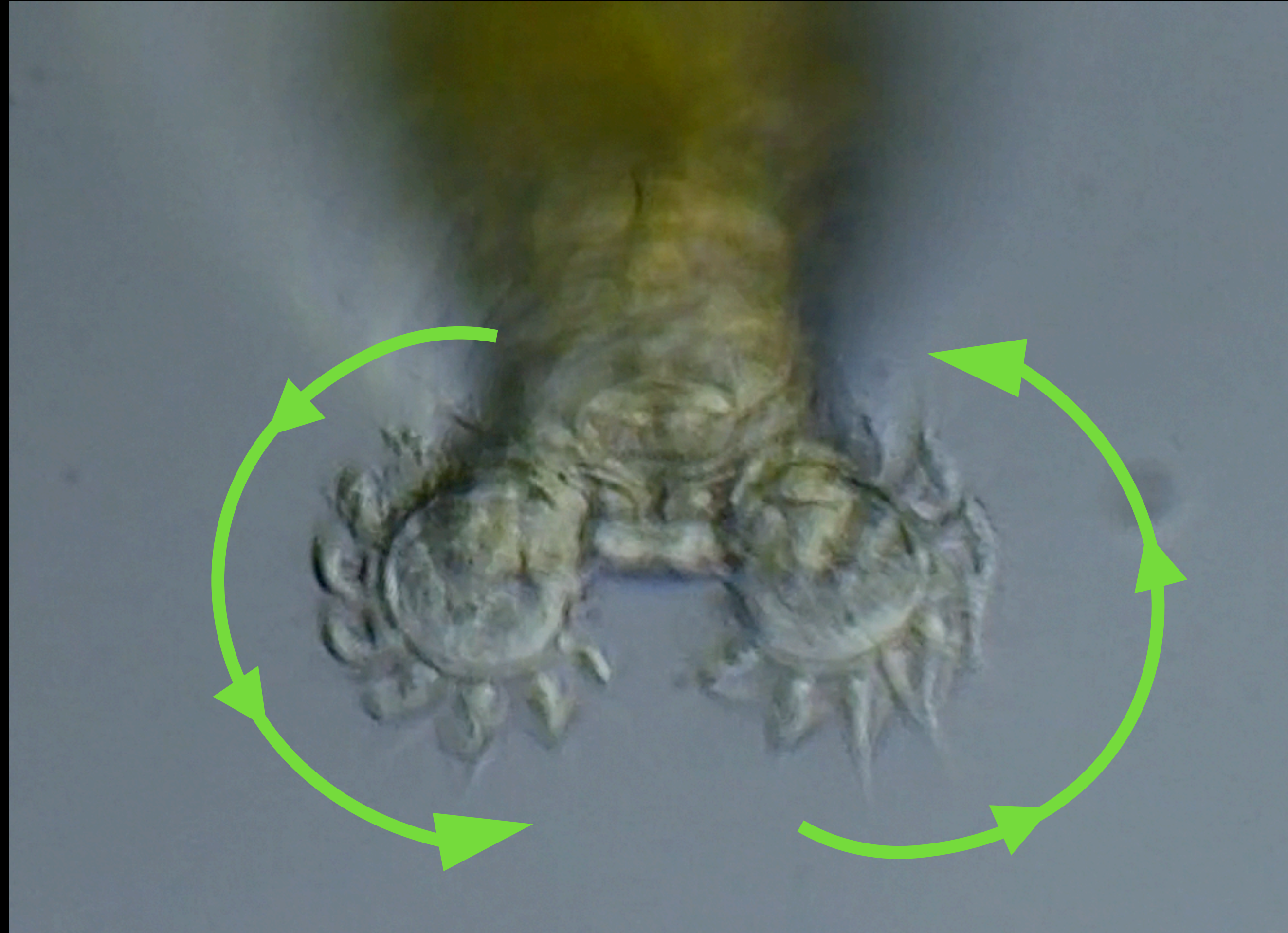
Der Cilienschlag bei vielen Rädertieren bewirkt einen **Wasserstrom**, welcher spiegelsymmetrisch verläuft.....



Partikel, gefärbt mit Karmin

(nach Zelinka (1886), verändert)

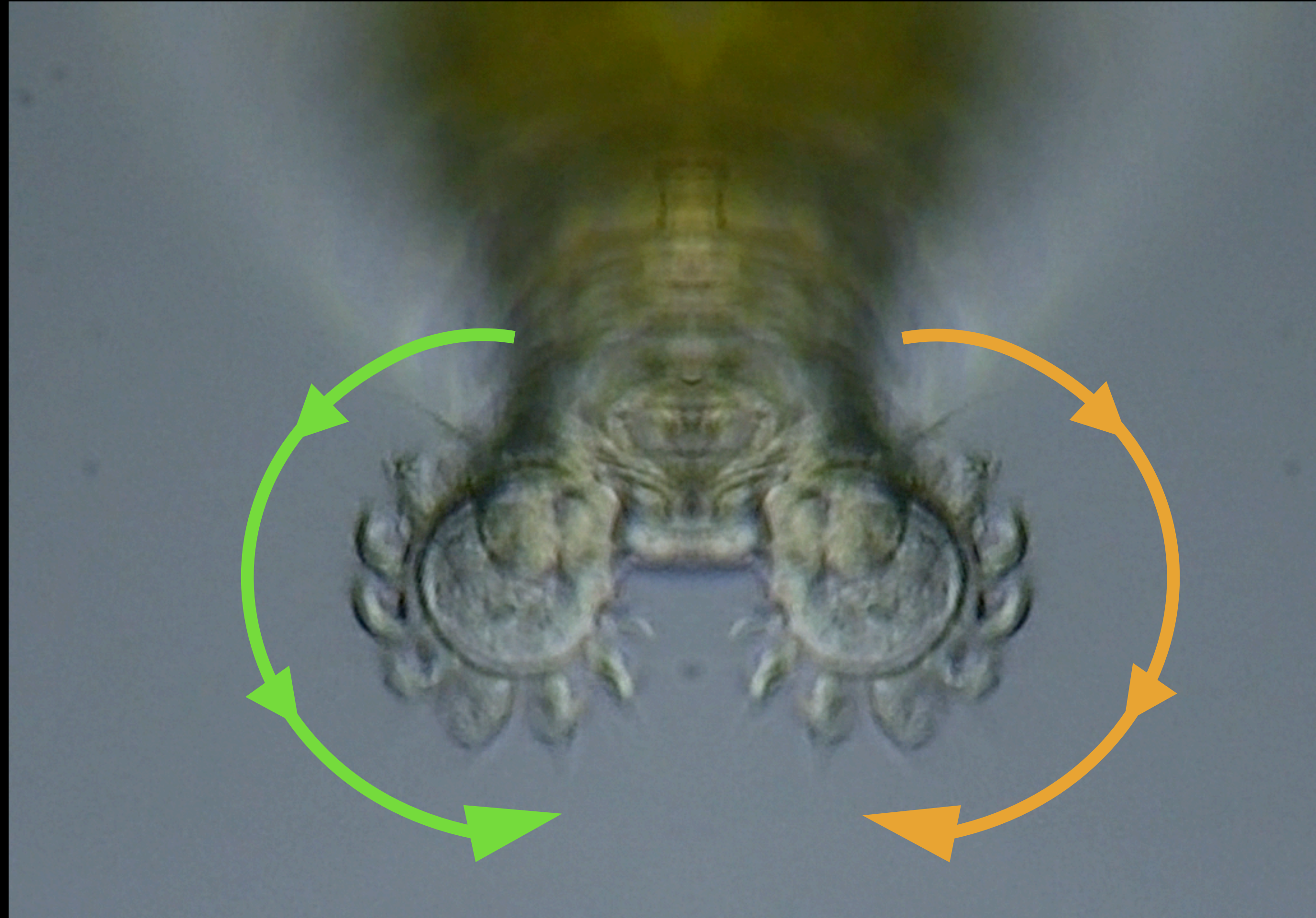
..... die bei diesem Rädertier sichtbare „Dreh“richtung ist aber **nicht** (spiegel)symmetrisch,



sondern **entgegen** dem Uhrzeigersinn (GUZS)

Gibt es denn sowas:

???



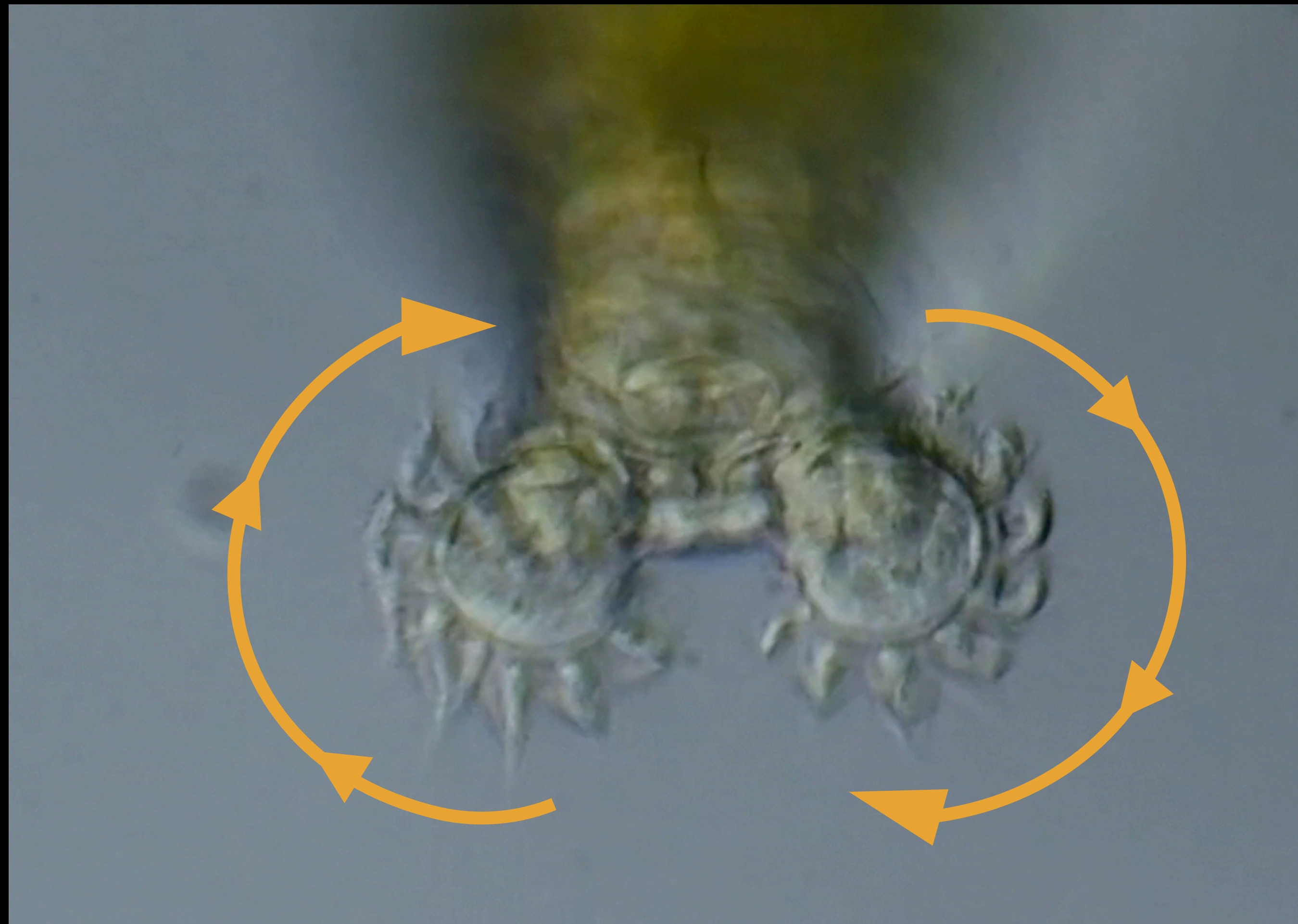
???

Fake!!!!

Spiegelsymmetrische Drehrichtung

Oder sowas:

??



??

Fake!!!!

„Drehrichtung“ im Uhrzeigersinn (UZS)



Wie können schnelle Bewegungen
von Organismen allgemein
und somit auch metachrone Bewegungen
nicht nur **beobachtet**, sondern auch
nachprüfbar dokumentiert werden?



Die metachrone Koordination
ist eines der auffälligsten Kennzeichen der Rädertiere

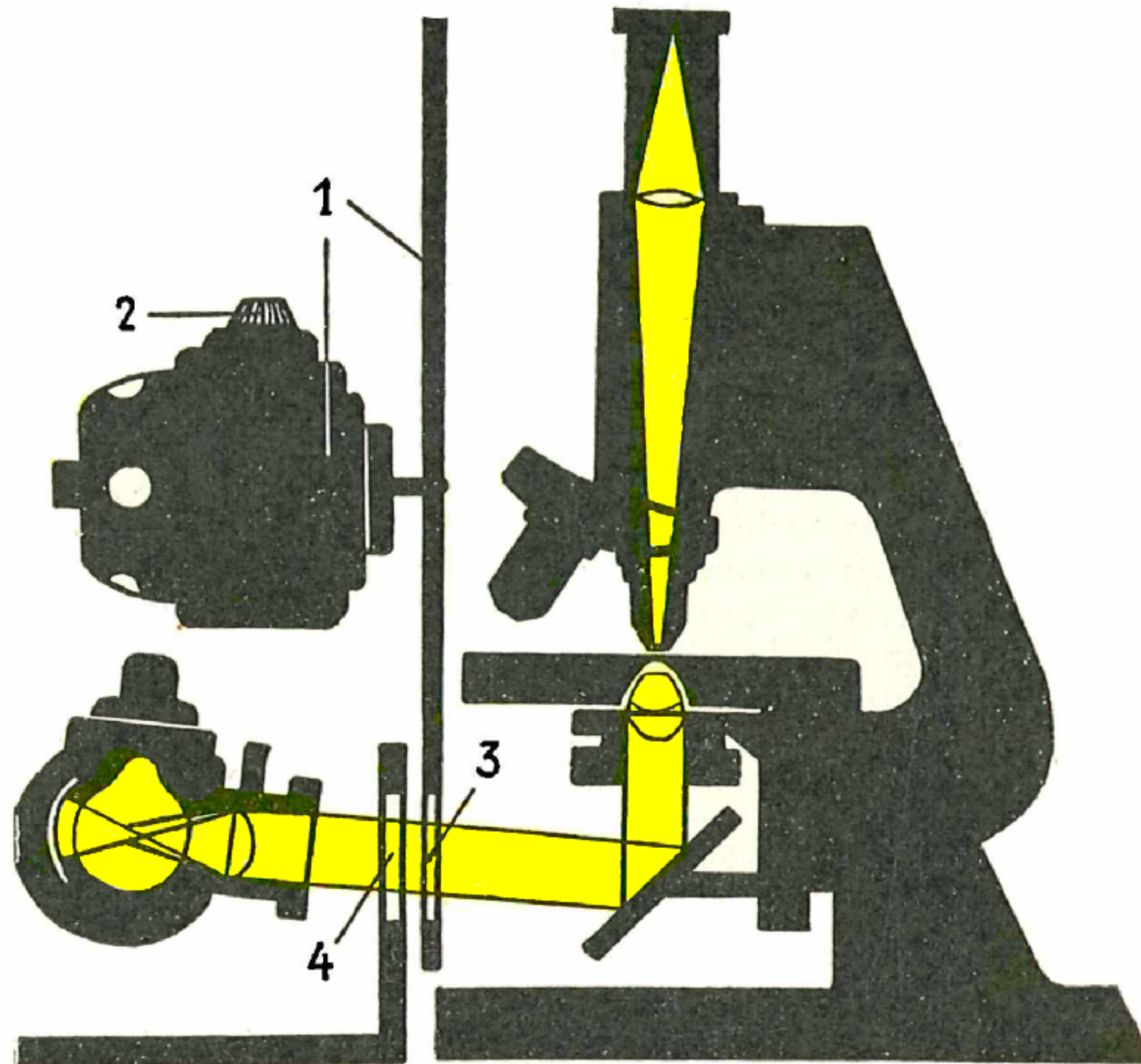
Diese Bewegung der Cilien
ist in der „Klassischen“ Literatur zur Morphologie der Rädertiere
(De Beauchamp, Remane, Wesenberg-Lund etc.)
nie genauer untersucht worden!

Methode 1: **Stroboskop**-Beleuchtung von Gossler (1948)

Die Werkzeuge zur **Beobachtung** eines Phänomens und dessen **Dokumentation** (im Sinne der Nachvollziehbarkeit) sind nicht immer identisch.

Abb. 2.
Schema der Apparatur.

- 1 Motor mit Scheibe,
- 2 Drehknopf des Regulators,
- 3 Schlitz in der Scheibe,
- 4 Zusätzliche Blende (Form analog dem Schlitz).



1200 - 1800
U/min

>>>>

20-30 Hz

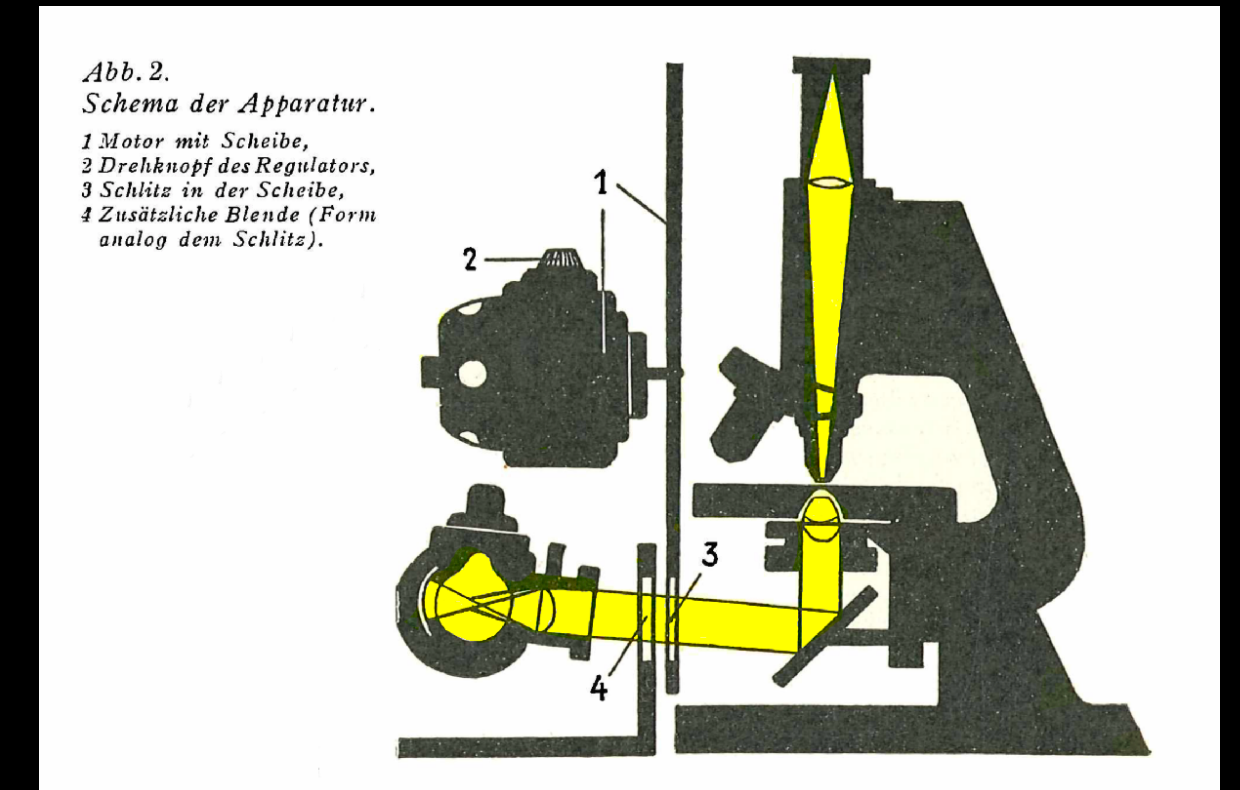
Methode 1: **Stroboskop**-Beleuchtung von Gossler (1948)

Bewertung der Methode:

1. Sie konnte nur zur **Beobachtung** verwendet werden, nicht zur **Dokumentation**, weil die Drehzahl der Scheibe nicht mit der Kamera synchronisiert werden konnte

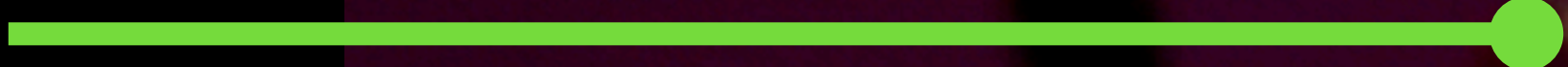
2. Ein entscheidendes Problem einer **jeden** Methode zur Untersuchung der **Bewegung von Mikroorganismen** bleibt aber auch hier bestehen:

die (geringe) **Tiefenschärfe!!!**



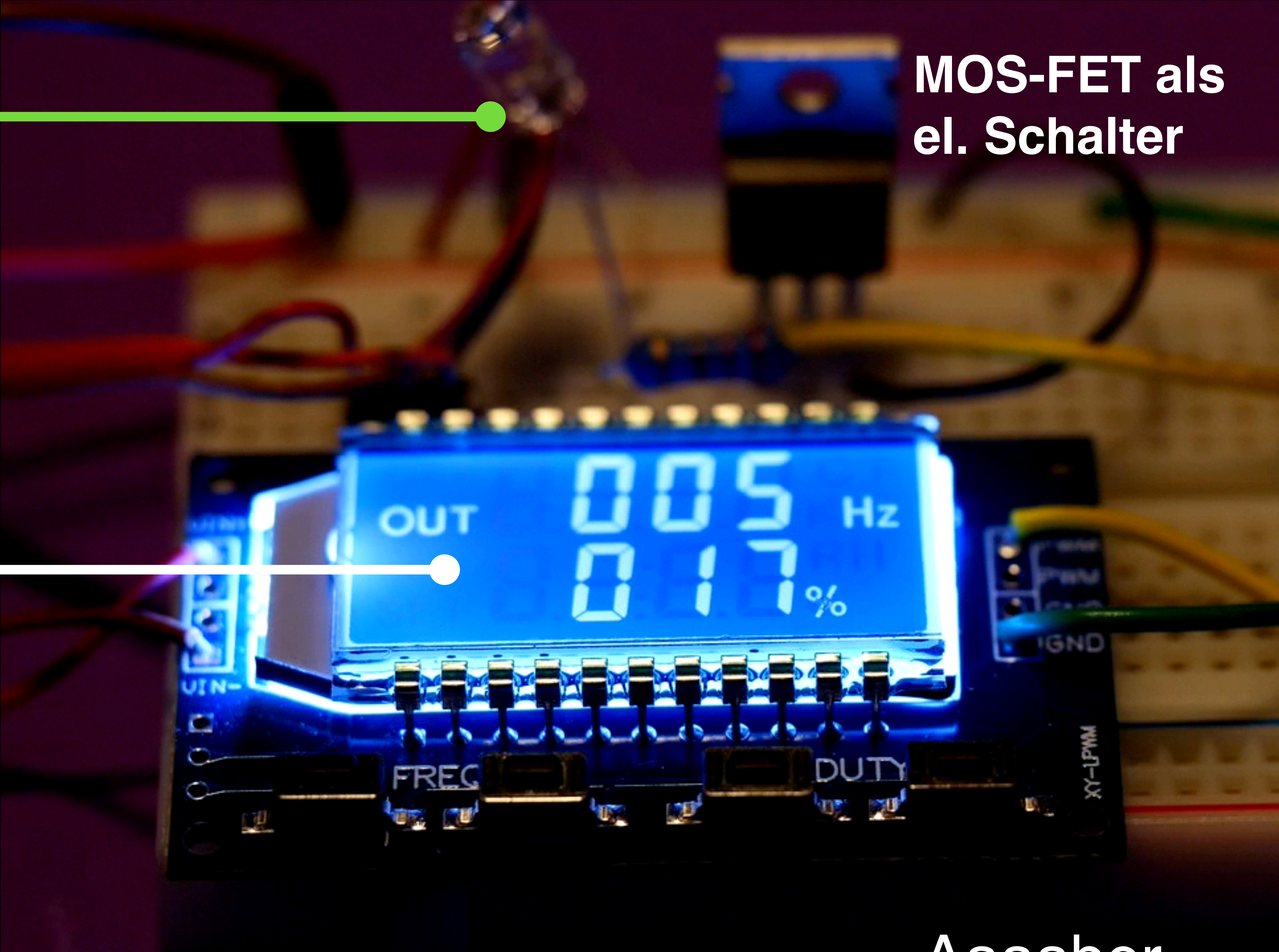
Eine Stroboskop-Beleuchtung lässt sich mit einfachen Mitteln realisieren:

LED



**MOS-FET als
el. Schalter**

**Rechteck-Generator
oder
Arduino**



Aaaaber....

Lösungsansatz 2: **Kamera**



Cassette für Film

Eine Filmkamera lieferte Einzelbilder,
die unabhängig von einander belichtet wurden

Lösungsansatz 2: **Kamera**

Eine **moderne** Kamera ist quasi ein Computer mit

- einem proprietären Betriebssystem
- einem Bildsensor und
- einem Loch für ein Objektiv



Eine moderne Kamera liefert meistens:

1. Einzelbilder, die **unabhängig voneinander** sind
2. Burst-Mode-Sequenzen von Einzelbildern, die **abhängig oder unabhängig voneinander** sind
3. Videosequenzen mit Bildern, die immer **voneinander abhängig !!!** sind.

Vorüberlegung: Anforderung an die Kamera: möglichst hohe Bildfrequenz



Der Ventilator dreht sich
während dieser Aufnahme
immer in **dieselbe** Richtung!

Die wirkliche Drehrichtung kann bei dieser Bildfrequenz nicht **dokumentiert** werden

Problem: zu niedrige Bildfrequenz führt zu Aliasing (Nyquist-Theorem)



Anforderung 1:

möglichst hohe Bildfrequenz

das Video demonstriert somit auch:

1. dass die metachrone Wellenbewegung der Corona-Cilien nicht konstant ist.
2. das grundsätzliche **Problem der begrenzten Tiefenschärfe** bei sich bewegenden Objekten

2 Kameras mit hoher Bildfrequenz:

75 Gpix/s

>>> 38 000 FHD-Bilder / sec
Global Shutter



Vision Research Phantom TMX 7510

> 100 000 €

2.1 Gpix/s

>>> 1000 FHD-Bilder / sec
Global Shutter



Krontech Chronos 2.1

≈ 10 000 €

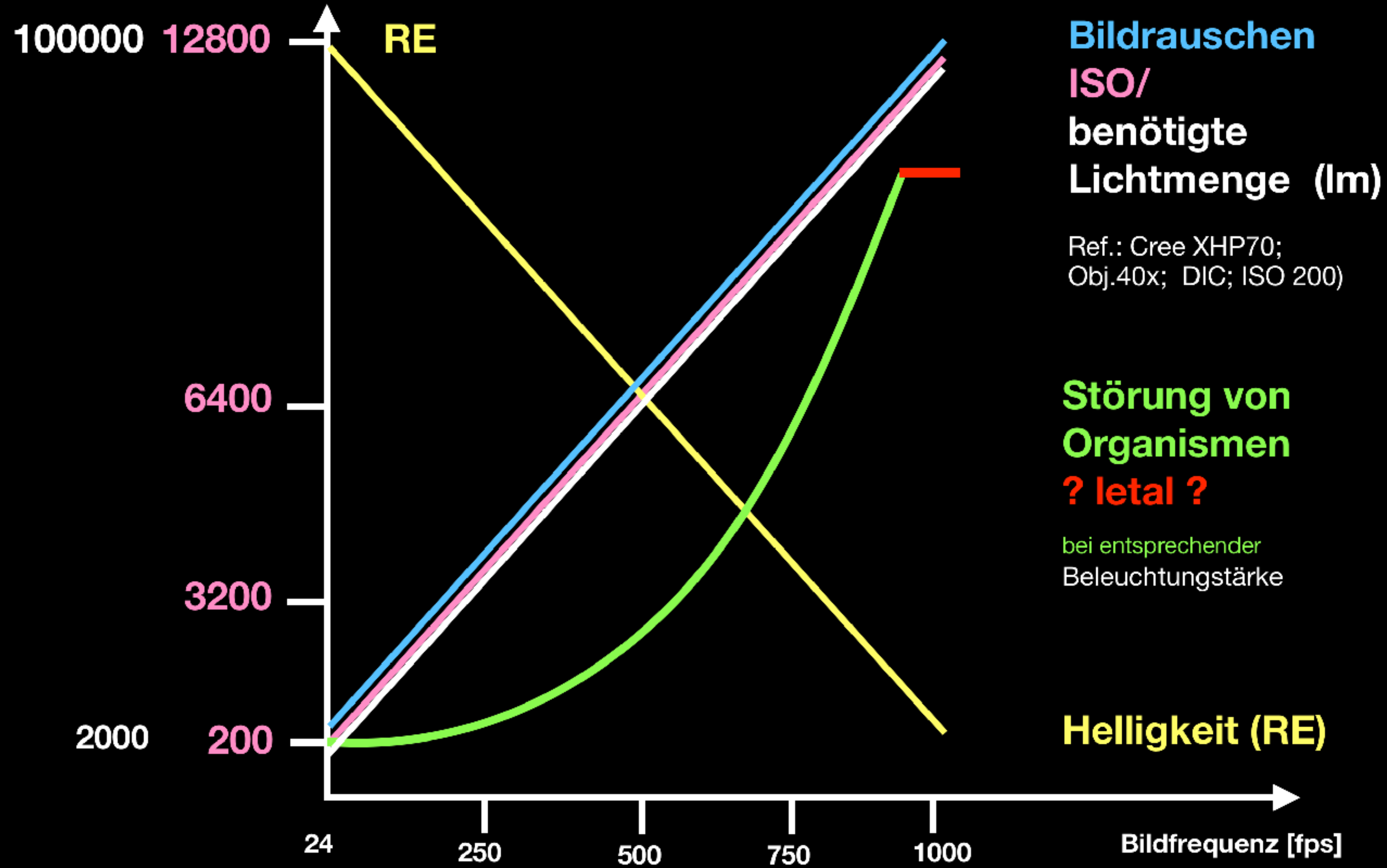
Bei hohen Bildfrequenzen stellt sich das Problem der Beleuchtung:



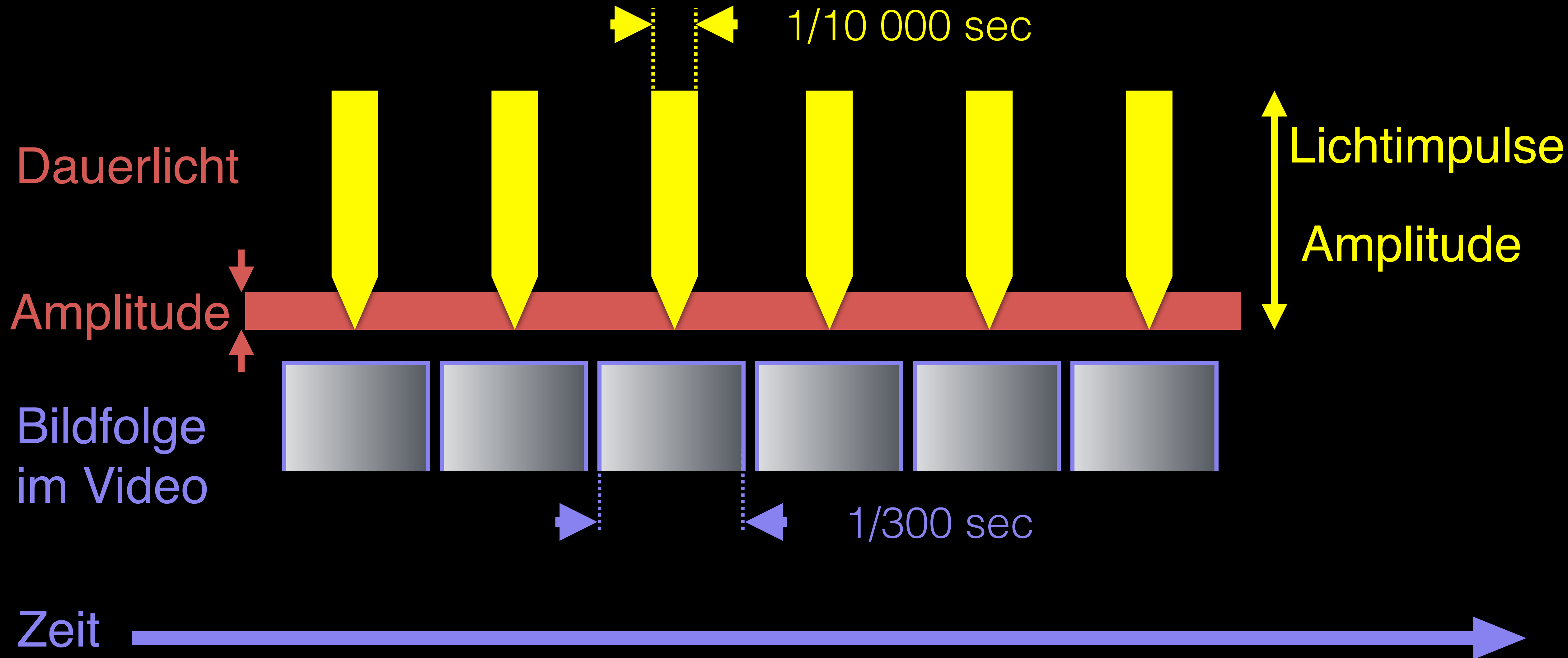
1000 Bilder / sec >>> Belichtungszeit $\leq 1/1000$ sec

Wie soll das Objekt beleuchtet werden, ohne geschädigt zu werden ?

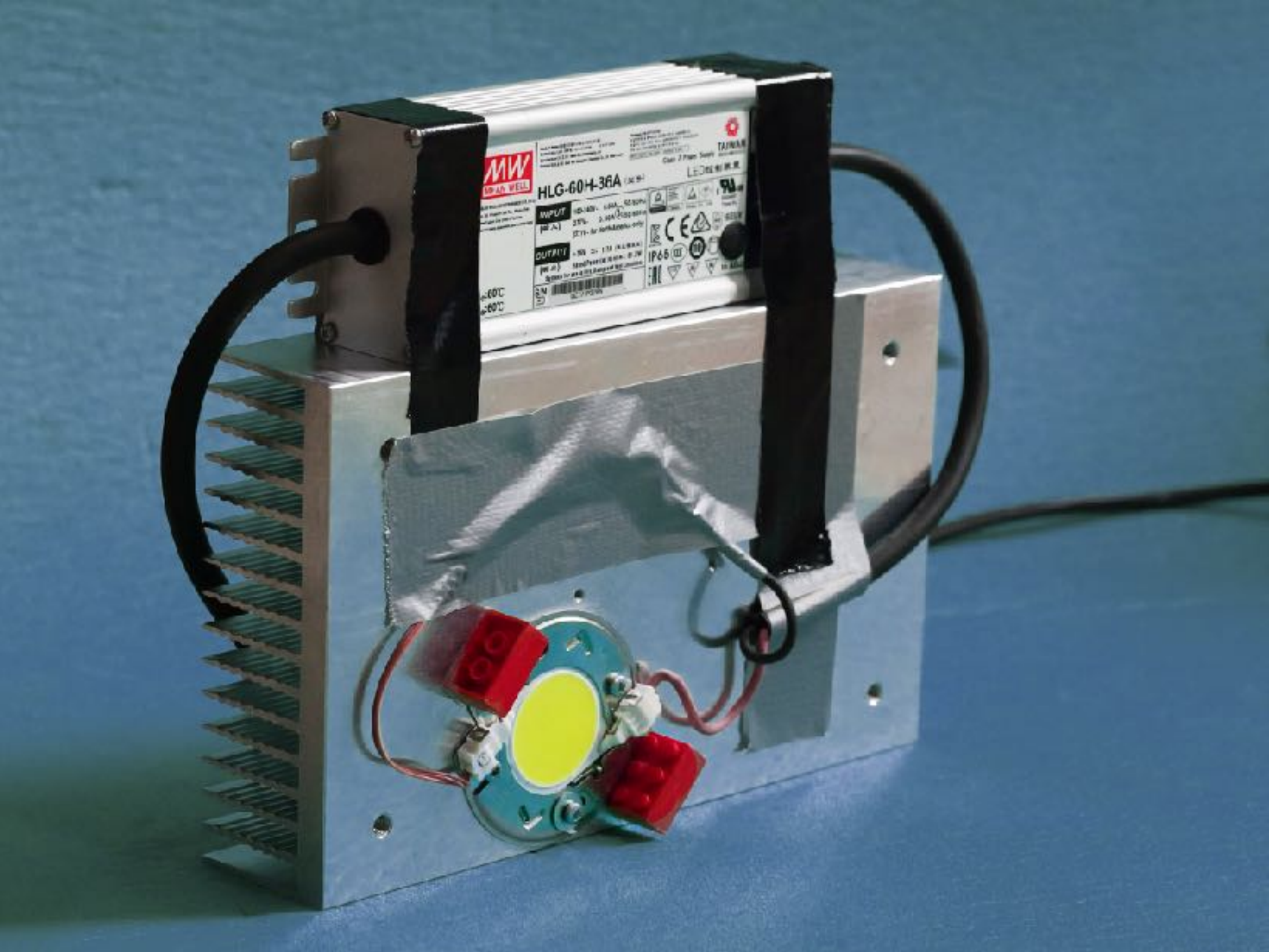
Vorüberlegungen: Abhängigkeit wichtiger Parameter von der Bildfrequenz (geschätzte Werte)



Vor-Überlegungen zur Beleuchtung: Dauerlicht vs. gepulste LED

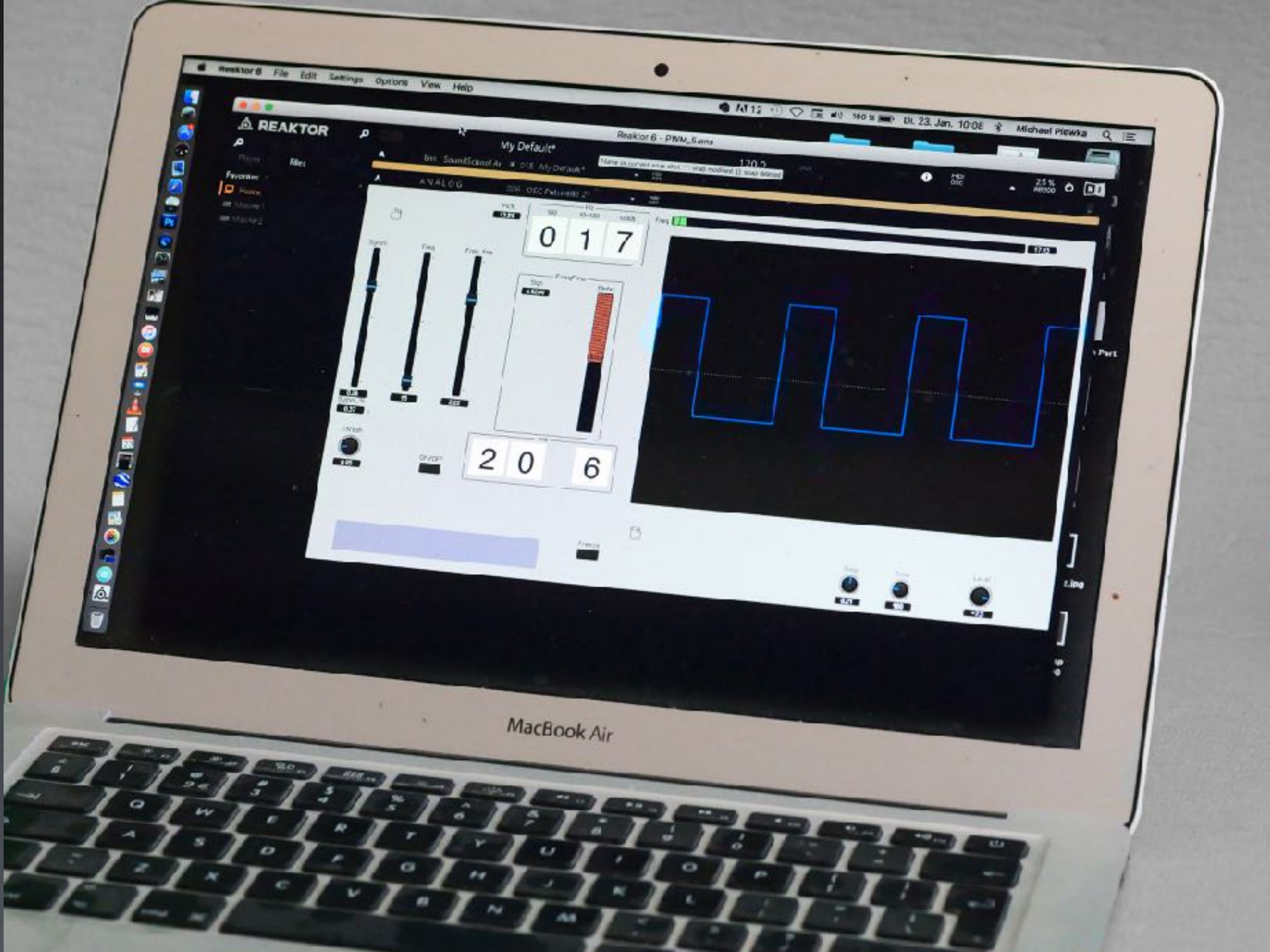


Mit chip-on-board (COB)-LEDs lassen sich hohe Beleuchtungsstärken bzw. kurze Lichtimpulse realisieren, aber.....



COB-LED

Software- Rechteckgenerator 32 bit

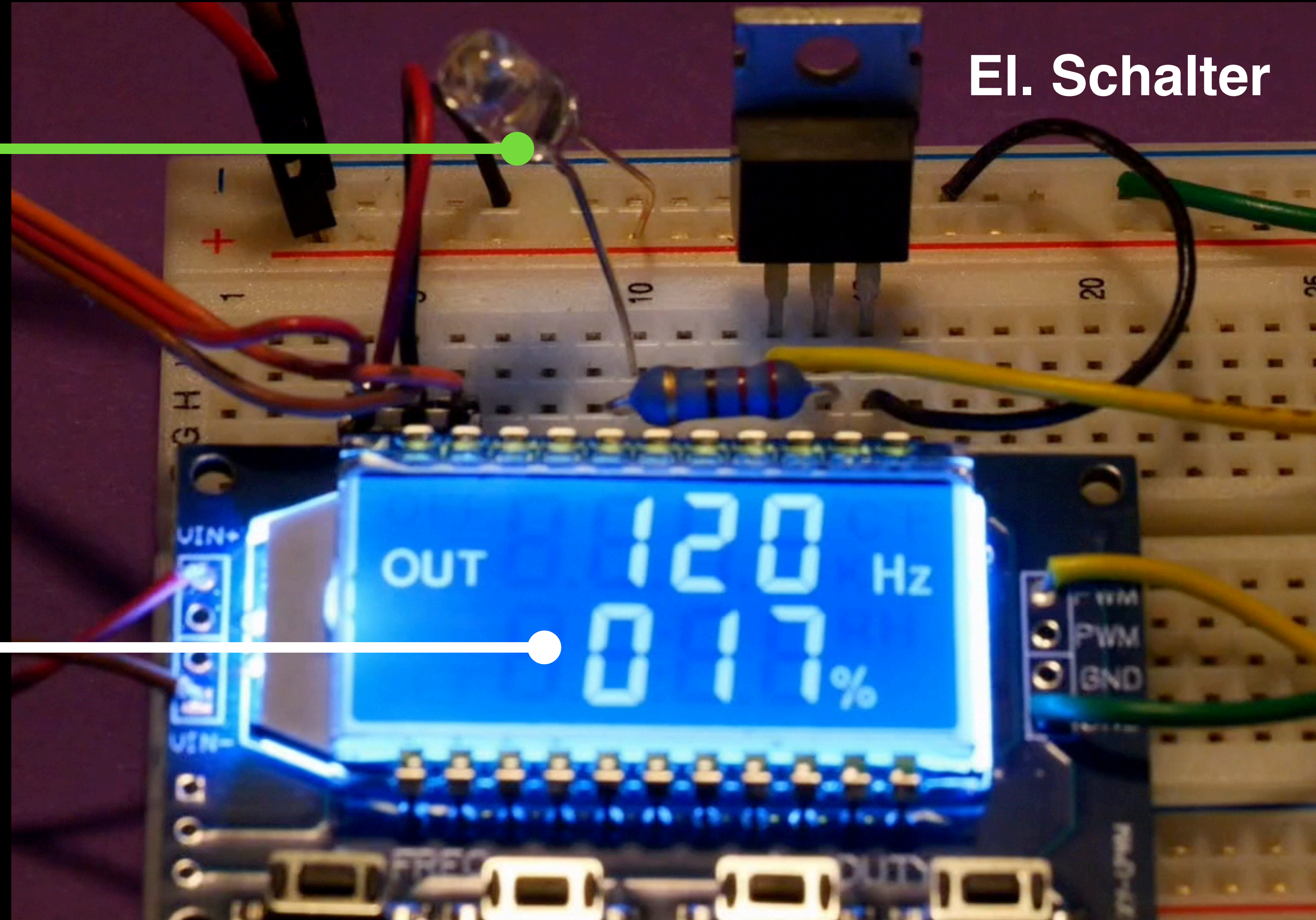


....die **Synchronisation** der Stroboskop-Beleuchtung mit der Kamera-Bild-Frequenz ist **das entscheidende** (für mich) noch nicht gelöste Problem

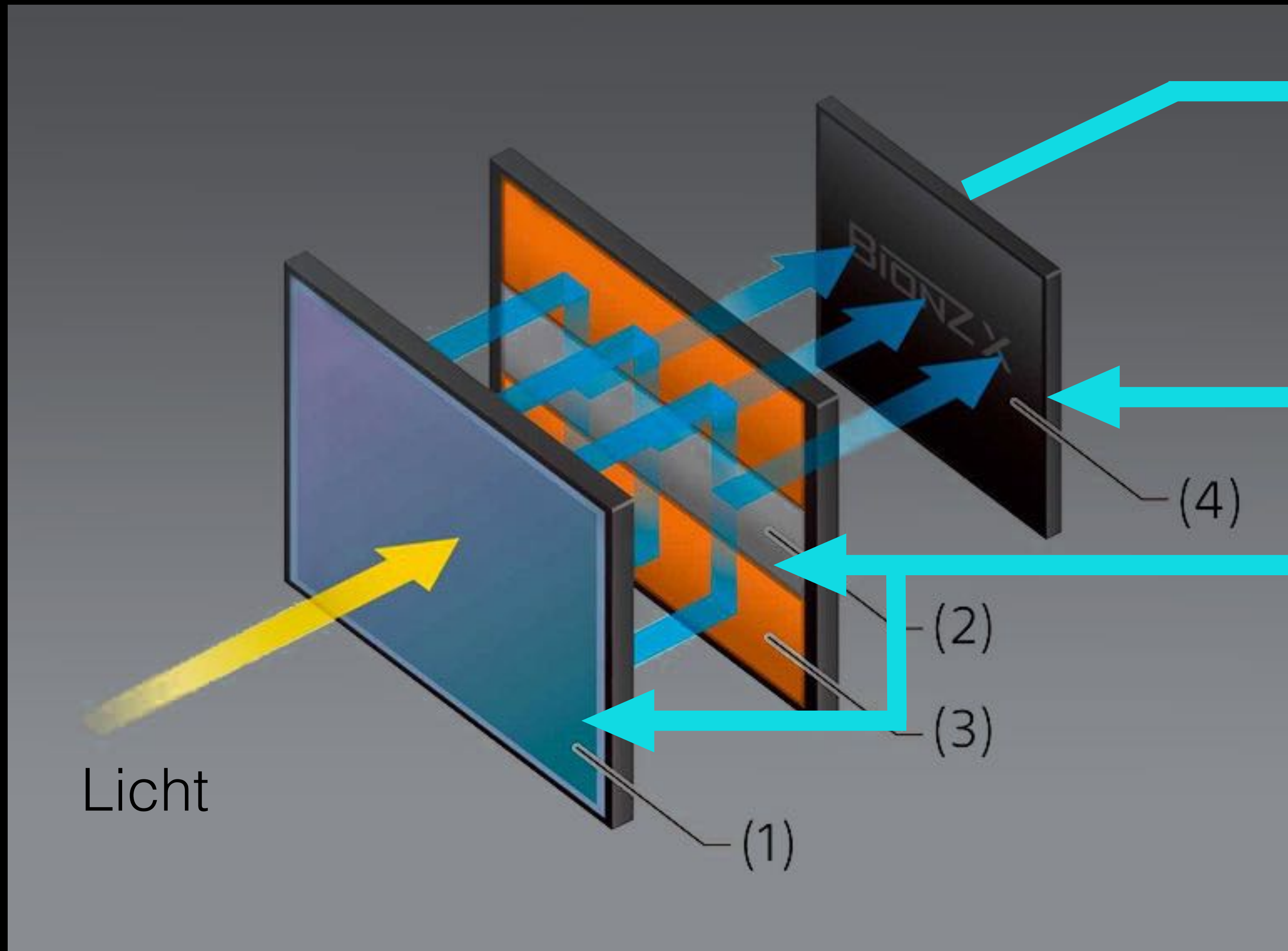
LED

El. Schalter

Rechteck-Generator
(Frequenz/Pulsweite)



Bei der Herstellung von Videos treten bezüglich der Bildfrequenz 3 „Nadelöhre“ auf

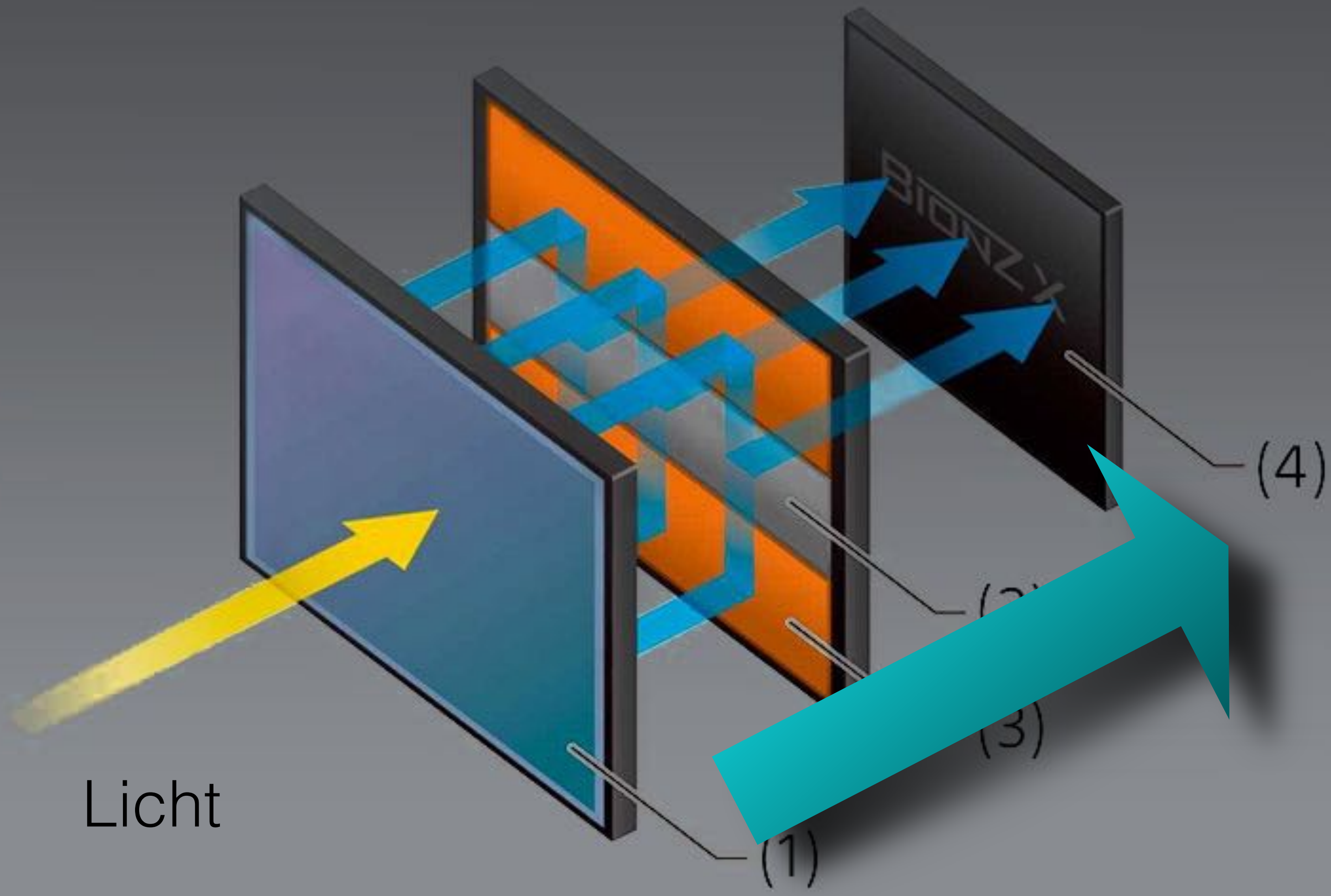


3. Speicher-Geschwindigkeit

2. Prozessorgeschwindigkeit

1. Auslösen + Auslesen
des Sensors

1. Bayer-Filter/Photodioden
2. A/D-Wandler
3. Zwischenspeicher
4. Prozessor



Fall-Beispiel:

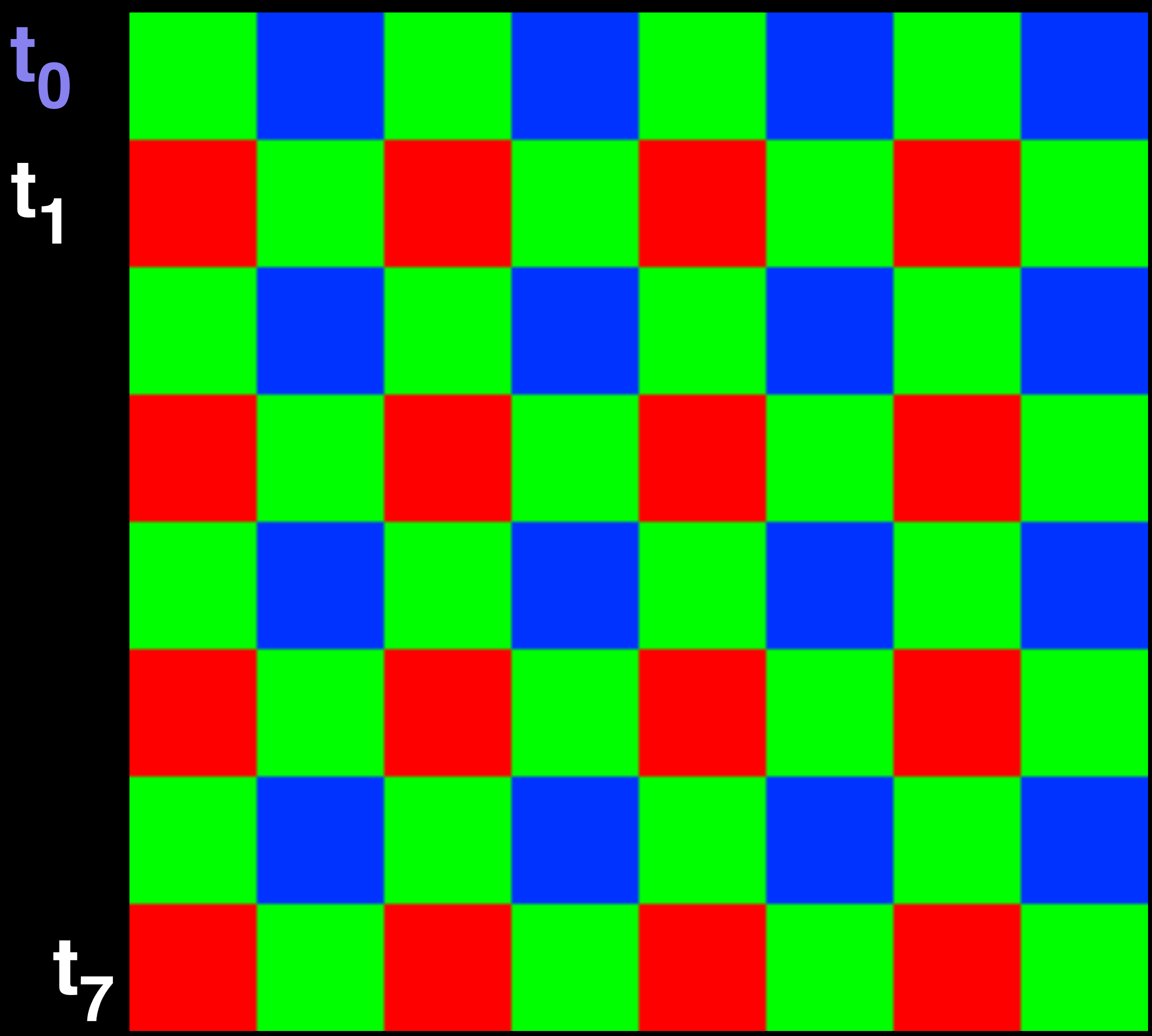
Sensor: 20 Megapixel
 Belichtungszeit 1/1000 sec

>>> Datenrate
 ≈ **40 GB / sec !!!!**

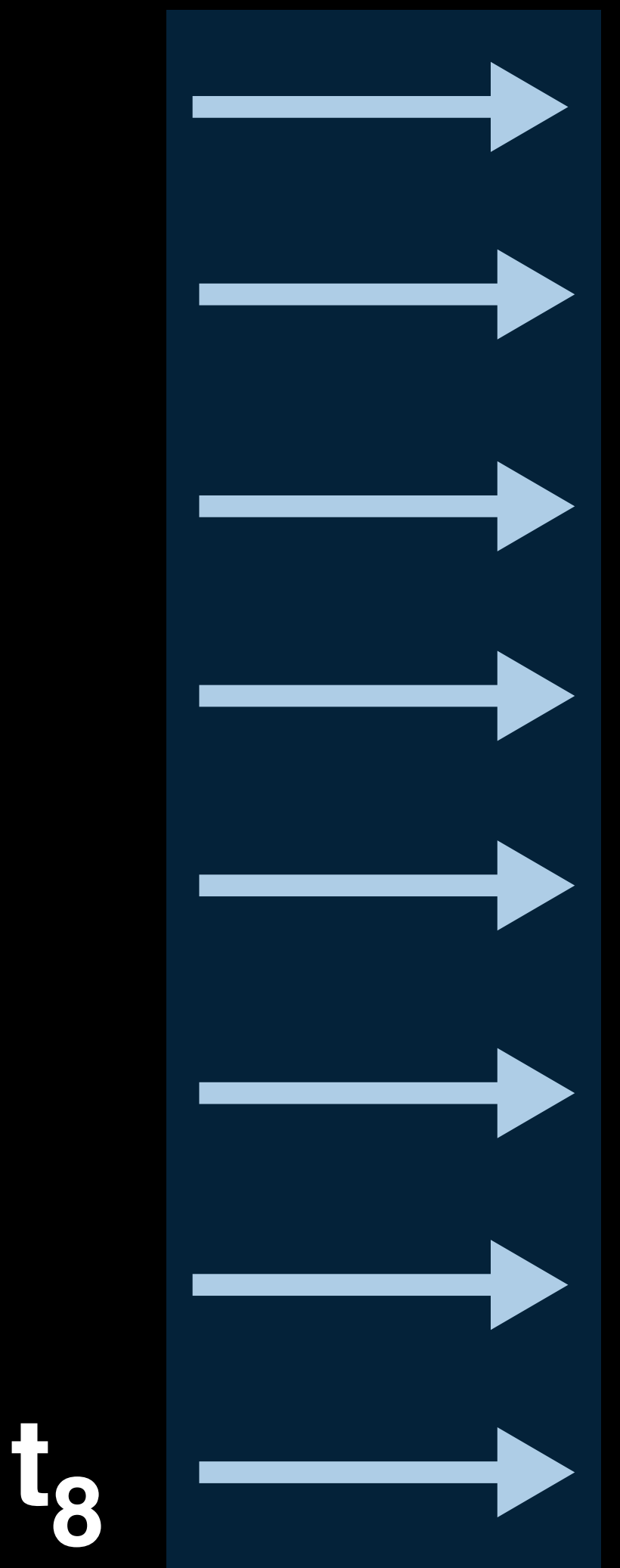
1. Bayer-Filter/Photodioden
2. A/D-Wandler
3. Zwischenspeicher
4. Prozessor

Rolling shutter: Beispiel: „Belichtungszeit“ („elektronischer Verschluss“) $\gg 1/8000$ sec

hypothet. Sensor 8x8 pixel



„Nadelöhr“:
Pipeline
Sensor -> Prozessor



Prozessor

$$t_1 = t_0 + 1/8000 \text{ sec}$$
$$t_2 = t_0 + 2/8000 \text{ sec}$$
$$t_3 = t_0 + 3/8000 \text{ sec}$$

⋮

$$t_n = t_0 + n/8000 \text{ sec}$$

(n= Anzahl der Bildzeilen)

Eine **elektronische** Verschlusszeit von z.B. 1/8000 sec bedeutet nicht, dass das Bild nach 1/8000 sec „fertig“ ist!



Das zeilenweise Auslesen des Sensors führt zu „rolling shutter“

„Rolling shutter“ :

im Bereich von:

≈ **8-10 ms**

für **alle!!!!** Consumer-Kameras (Nikon, Sony, Canon, Panasonic, Olympus etc.) nach 2021

außer Sony A9 Mk 3

Das gilt somit sowohl für Videos als auch für Fotos (vom gesamten! Sensor)!

(>> <https://www.dpreview.com>)

Für die Fragestellung ist eine möglichst hohe Bildfrequenz erforderlich.

300 fps >>> $\approx 0,6$ Gpix/s



Lumix GH6 / GH9 MK2 (**Rolling Shutter**)

Folgende Kameras haben in etwa dieselben Werte (≈ 1 Gpix/sec) bezüglich der Pixelfrequenz bei Videos **nicht der Bildfrequenz!!!!**

- Canon R3/ R5/ R6 (**Rolling S.**)
- Nikon Z9 - Z7 (**Rolling S.**)
- Sony A1 /A7/ A9 (**Rolling S.**)
- Sony A9 **Mk III** (**Global S.**)
- Sony Xperia? (0,2 sec>> unbrauchbar)
- Sony RX100IV >>> 1000fps bei 800x270 pix = 0.216 Mpix/s für 4 secs

(Stand Ende 2023):

Auch kaufentscheidend: Option für „Synchronisation“



Synchronisation
über SMPTE

(SMPTE ist ein
Digitalcode, der analog
übertragen werden kann)

Lumix GH6 / GH9 MK2:

Ist man z.B. eine Canon 600 gewöhnt, ist die Auswahl der Video-Aufnahme-Optionen sehr verwirrend:



❖ [Rec. File Format]: [MP4]

- YUV, Bit value, Image compression:
 - [10bit] recording quality: 4:2:0, 10 bit, Long GOP
 - [8bit] recording quality: 4:2:0, 8 bit, Long GOP
- Audio format: AAC (2ch)

[System Frequency]: [59.94Hz (NTSC)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
	FULL	PIXEL PIXEL					
[4K/10bit/100M/60p]	✓	✓	3840×2160	16:9	59.94p	100	HEVC
[4K/10bit/72M/30p]	✓	✓	3840×2160	16:9	29.97p	72	HEVC
[4K/8bit/100M/30p]	✓	✓	3840×2160	16:9	29.97p	100	AVC
[4K/10bit/72M/24p]	✓	✓	3840×2160	16:9	23.98p	72	HEVC
[4K/8bit/100M/24p]	✓	✓	3840×2160	16:9	23.98p	100	AVC
[FHD/8bit/28M/60p]	✓	✓	1920×1080	16:9	59.94p	28	AVC
[FHD/8bit/20M/30p]	✓	✓	1920×1080	16:9	29.97p	20	AVC
[FHD/8bit/24M/24p]	✓	✓	1920×1080	16:9	23.98p	24	AVC

[System Frequency]: [50.00Hz (PAL)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
	FULL	PIXEL PIXEL					
[4K/10bit/100M/50p]	✓	✓	3840×2160	16:9	50.00p	100	HEVC
[4K/10bit/72M/25p]	✓	✓	3840×2160	16:9	25.00p	72	HEVC
[4K/8bit/100M/25p]	✓	✓	3840×2160	16:9	25.00p	100	AVC
[FHD/8bit/28M/50p]	✓	✓	1920×1080	16:9	50.00p	28	AVC
[FHD/8bit/20M/25p]	✓	✓	1920×1080	16:9	25.00p	20	AVC

❖ [Rec. File Format]: [MOV]

- YUV, Bit value, Image compression:
 - [422/10-I] recording quality: 4:2:2, 10 bit, ALL-Intra
 - [422/10-L] recording quality: 4:2:2, 10 bit, Long GOP
 - [420/10-L] recording quality: 4:2:0, 10 bit, Long GOP
- Audio format: LPCM (4ch)¹

[System Frequency]: [59.94Hz (NTSC)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.8K/30p/420/10-L]	✓	5760×4320	4:3	29.97p	200	HEVC
[5.8K/24p/420/10-L]	✓	5760×4320	4:3	23.98p	200	HEVC
[5.7K/60p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	59.94p	300	HEVC
[5.7K/48p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	47.95p	300	HEVC
[5.7K/30p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	200	HEVC
[5.7K/24p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	200	HEVC
[4.4K/60p/420/10-L]	✓	4352×3264	4:3	59.94p	300	HEVC
[4.4K/48p/420/10-L]	✓	4352×3264	4:3	47.95p	300	HEVC
[C4K/120p/420/10-L]	✓	4096×2160	17:9	119.88p	300	HEVC
[C4K/60p/422/10-(H)] ²	✓	4096×2160	17:9	59.94p	800	AVC
[C4K/60p/422/10-(L)] ²	✓	4096×2160	17:9	59.94p	600	AVC
[C4K/60p/422/10-L]	✓	4096×2160	17:9	59.94p	200	AVC
[C4K/60p/420/10-L]	✓	4096×2160	17:9	59.94p	200	HEVC
[C4K/48p/422/10-(H)] ²	✓	4096×2160	17:9	47.95p	800	AVC
[C4K/48p/422/10-(L)] ²	✓	4096×2160	17:9	47.95p	600	AVC
[FHD/240p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	239.76p	800	AVC
[FHD/240p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	239.76p	200	AVC
[FHD/240p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	239.76p	200	HEVC
[FHD/120p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	119.88p	400	AVC
[FHD/120p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	119.88p	150	AVC
[FHD/120p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	119.88p	150	HEVC
[FHD/80p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	59.94p	200	AVC
[FHD/80p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	59.94p	100	AVC
[FHD/60p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	59.94p	100	HEVC
[FHD/60p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	59.94p	100	AVC
[FHD/60p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	59.94p	50	AVC
[FHD/48p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	47.95p	200	AVC
[FHD/48p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	47.95p	100	AVC
[FHD/48p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	47.95p	100	HEVC
[FHD/30p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	29.97p	200	AVC
[FHD/30p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	29.97p	100	AVC
[FHD/30p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	29.97p	100	HEVC
[FHD/24p/422/10-I]	✓	1920×1080	16:9	23.98p	200	AVC
[FHD/24p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	23.98p	100	AVC
[FHD/24p/420/10-L]	✓	1920×1080	16:9	23.98p	100	HEVC

❖ [Rec. File Format]: [Apple ProRes]

- Audio format: LPCM (4ch)¹
- 📷: Available in Creative Video mode.
- (A) Recording frame rate
- (B) Bit rate (Gbps)
- (C) Video compression format (422 HQ: Apple ProRes 422 HQ, 422: Apple ProRes 422)

[System Frequency]: [59.94Hz (NTSC)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.7K/30p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	1.9	422 HQ
[5.7K/30p/422]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	1.3	422
[5.7K/24p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	1.5	422 HQ
[5.7K/24p/422]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	1.0	422

[System Frequency]: [50.00Hz (PAL)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.7K/25p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	25.00p	1.6	422 HQ
[5.7K/25p/422]	✓	5728×3024	17:9	25.00p	1.1	422

[System Frequency]: [24.00Hz (CINEMA)]

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.7K/24p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	24.00p	1.5	422 HQ
[5.7K/24p/422]	✓	5728×3024	17:9	24.00p	1.0	422

Die Auswahl an Video-Aufnahme-Optionen ist sehr groß:

❖ [Rec. File Format]: [MOV]

- YUV, Bit value, Image compression:
 - [422/10-I] recording quality: 4:2:2, 10 bit, ALL-Intra
 - [422/10-L] recording quality: 4:2:2, 10 bit, Long GOP
 - [420/10-L] recording quality: 4:2:0, 10 bit, Long GOP
- Audio format: LPCM (4ch)¹

[System Frequency]: [59.94Hz (NTSC)]								
[Rec Quality]	📷	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
		FULL	PIXEL PIXEL					
[5.8K/30p/420/10-L]	✓	✓		5760×4320	4:3	29.97p	200	HEVC
[5.8K/24p/420/10-L]	✓	✓		5760×4320	4:3	23.98p	200	HEVC
[5.7K/60p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	59.94p	300	HEVC
[5.7K/48p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	47.95p	300	HEVC
[5.7K/30p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	200	HEVC
[5.7K/24p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	23.98p	200	HEVC
[4.4K/60p/420/10-L]	✓	✓		4352×3264	4:3	59.94p	300	HEVC
[4.4K/48p/420/10-L]	✓	✓		4352×3264	4:3	47.95p	300	HEVC
[C4K/120p/420/10-L]	✓	✓	✓	4096×2160	17:9	119.88p	300	HEVC
[C4K/60p/422/10-I(H)] ²		✓	✓	4096×2160	17:9	59.94p	800	AVC
[C4K/60p/422/10-I(L)] ²		✓	✓	4096×2160	17:9	59.94p	600	AVC
[C4K/60p/422/10-L]		✓	✓	4096×2160	17:9	59.94p	200	AVC
[C4K/60p/420/10-L]		✓	✓	4096×2160	17:9	59.94p	200	HEVC
[C4K/48p/422/10-I(H)] ²		✓	✓	4096×2160	17:9	47.95p	800	AVC
[C4K/48p/422/10-I(L)] ²		✓	✓	4096×2160	17:9	47.95p	600	AVC

❖ [Rec. File Format]: [Apple ProRes]

- Audio format: LPCM (4ch)^{*}

📷: Available in Creative Video mode.

(A) Recording frame rate

(B) Bit rate (Gbps)

(C) Video compression format (422 HQ: Apple ProRes 422 HQ, 422: Apple ProRes 422)

[System Frequency]: [59.94Hz (NTSC)]								
[Rec Quality]	📷	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
		FULL	PIXEL PIXEL					
[5.7K/30p/422 HQ]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	1.9	422 HQ
[5.7K/30p/422]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	1.3	422
[5.7K/24p/422 HQ]	✓	✓		5728×3024	17:9	23.98p	1.5	422 HQ
[5.7K/24p/422]	✓	✓		5728×3024	17:9	23.98p	1.0	422

[System Frequency]: [50.00Hz (PAL)]								
[Rec Quality]	📷	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
		FULL	PIXEL PIXEL					
[5.7K/25p/422 HQ]	✓	✓		5728×3024	17:9	25.00p	1.6	422 HQ
[5.7K/25p/422]	✓	✓		5728×3024	17:9	25.00p	1.1	422

Die Bildfrequenz ist von Prozessor-Geschwindigkeit und Speicher-Geschwindigkeit abhängig:

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.8K/30p/420/10-L]	✓	5760×4320	4:3	29.97p	200	HEVC
[5.8K/24p/420/10-L]	✓	5760×4320	4:3	23.98p	200	HEVC
[5.7K/60p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	59.94p	300	HEVC
[5.7K/48p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	47.95p	300	HEVC
[5.7K/30p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	200	HEVC
[5.7K/24p/420/10-L]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	200	HEVC
[4.4K/60p/420/10-L]	✓	4352×3264	4:3	59.94p	300	HEVC
[4.4K/48p/420/10-L]	✓	4352×3264	4:3	47.95p	300	HEVC
[C4K/120p/420/10-L]	✓	4096×2160	17:9	119.88p	300	HEVC
[FHD/240p/422/10-L]	✓	1920×1080	16:9	239.76p	200	AVC

[Rec Quality]	[Image Area of Video]	Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
[5.7K/30p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	1.9	422 HQ
[5.7K/30p/422]	✓	5728×3024	17:9	29.97p	1.3	422
[5.7K/24p/422 HQ]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	1.5	422 HQ
[5.7K/24p/422]	✓	5728×3024	17:9	23.98p	1.0	422

HEVC (=H265) / AVC (H264)

Prozessor-Leistung/
Kompression: —————→ hoch ≈ **120x**

Datenrate: niedrig **200 Mb/s**

ProRes >>

Prozessor-Leistung/
Kompression: —————→ niedrig ≈ **12x**

Datenrate: sehr hoch **1900 Mb/s**

Die Bildfrequenz ist von **Prozessor-Geschwindigkeit** und Speicher-Geschwindigkeit abhängig:

[Rec Quality]	📷	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
		FULL	PIXEL PIXEL					
[5.8K/30p/420/10-L]	✓	✓		5760×4320	4:3	29.97p	200	HEVC
[5.8K/24p/420/10-L]	✓	✓		5760×4320	4:3	23.98p	200	HEVC
[5.7K/60p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	59.94p	300	HEVC
[5.7K/48p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	47.95p	300	HEVC
[5.7K/30p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	200	HEVC
[5.7K/24p/420/10-L]	✓	✓		5728×3024	17:9	23.98p	200	HEVC
[4.4K/60p/420/10-L]	✓	✓		4352×3264	4:3	59.94p	300	HEVC
[4.4K/48p/420/10-L]	✓	✓		4352×3264	4:3	47.95p	300	HEVC
[C4K/120p/420/10-L]	✓	✓	✓	4096×2160	17:9	119.88p	300	HEVC
[FHD/240p/422/10-L]	✓	✓		1920×1080	16:9	239.76p	200	AVC

[Rec Quality]	📷	[Image Area of Video]		Resolution	Aspect ratio	(A)	(B)	(C)
		FULL	PIXEL PIXEL					
[5.7K/30p/422 HQ]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	1.9	422 HQ
[5.7K/30p/422]	✓	✓		5728×3024	17:9	29.97p	1.3	422
[5.7K/24p/422 HQ]	✓	✓		5728×3024	17:9	23.98p	1.5	422 HQ

H 264/ H 265 >>

Prozessor-Leistung/ Kompression: begrenzender Faktor: Bildfrequenz von 240 fps ist nur bei FHD möglich

Speicherbandbreite: niedrig

Vergleich H264 vs ProRes



Die **mögliche** Bildfrequenz ist abhängig von der Anzahl der Pixel, die vom Sensor ausgelesen werden.

Beispiel:

Ein Sensor habe 48 Megapixel, z.B. **8000x6000** Pixel.

Wie erzeugt die Kamera dann einen **4k Film**?

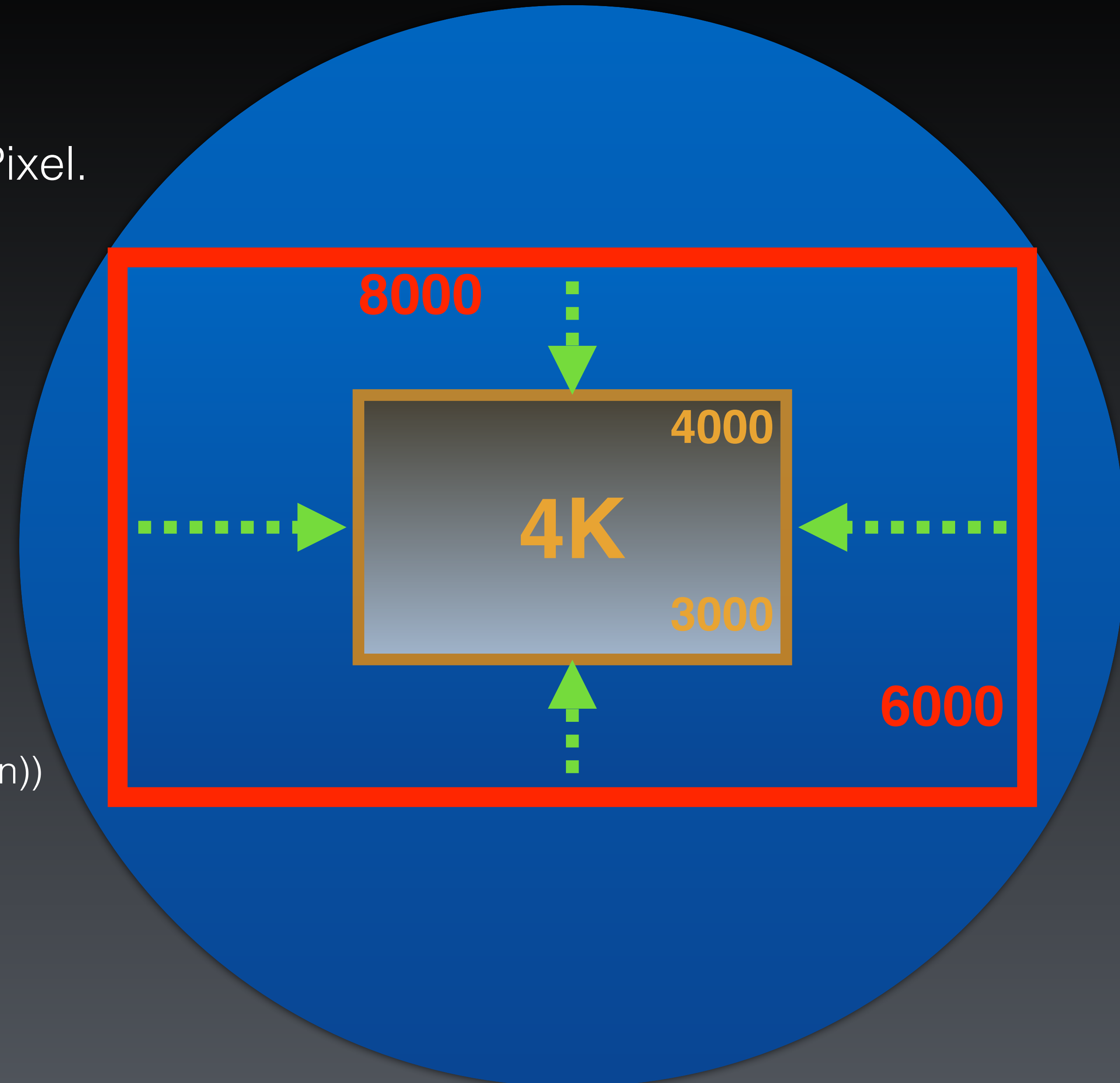
2 Möglichkeiten:

1. Interpolation:

Der Sensor wird komplett ausgelesen.
Aus dem **8000x6000** Bild wird ein **4000x3000**
interpoliert (Pixelbinning
(>>> mit der Möglichkeit, das Bildrauschen herauszurechnen))

2. Ausschnitt (Crop)

Es wird nur ein Teil des Sensors ausgelesen (Crop).

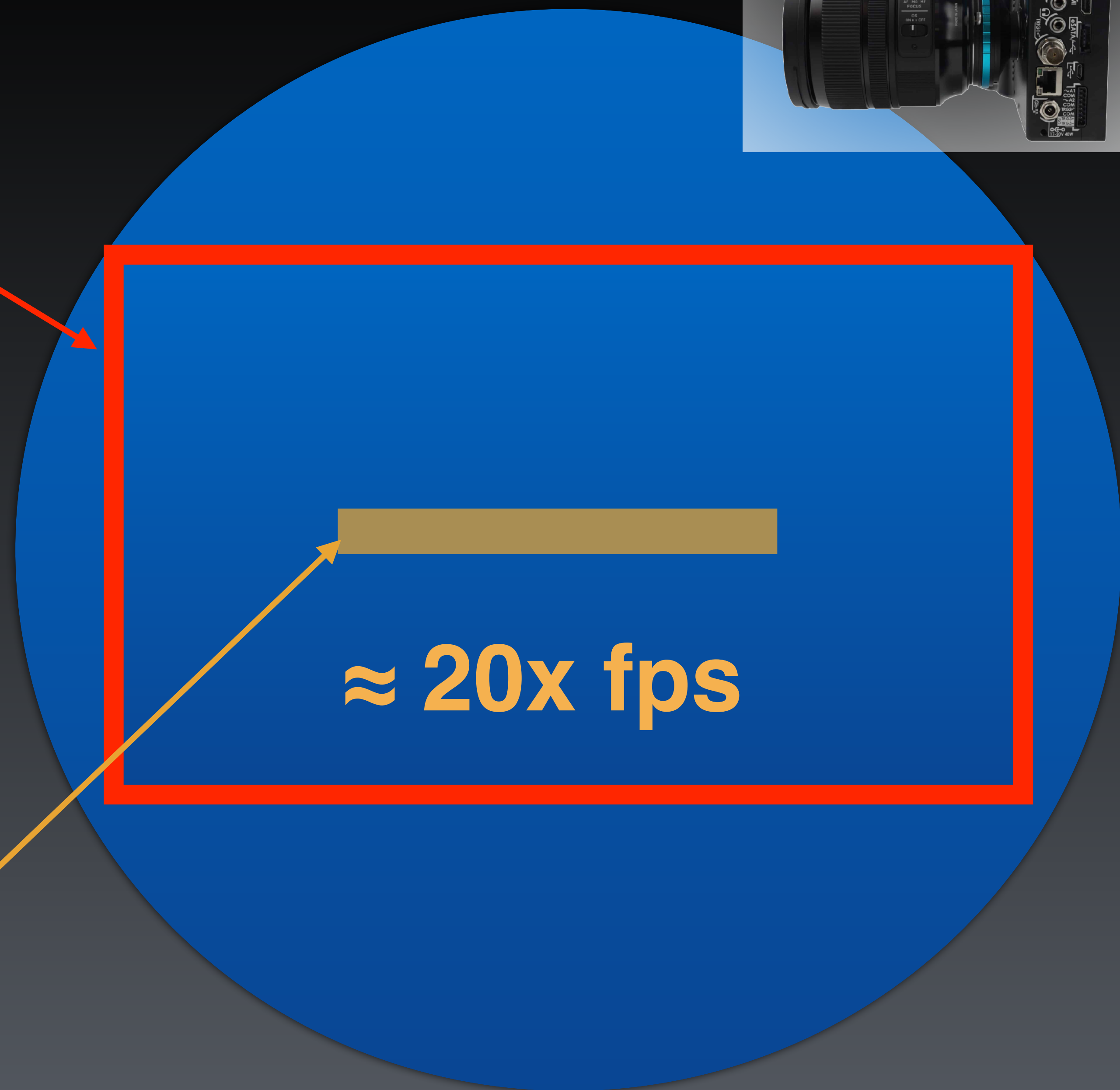


Durch Reduktion der ausgelesenen Bildfläche steigt die Bildfrequenz



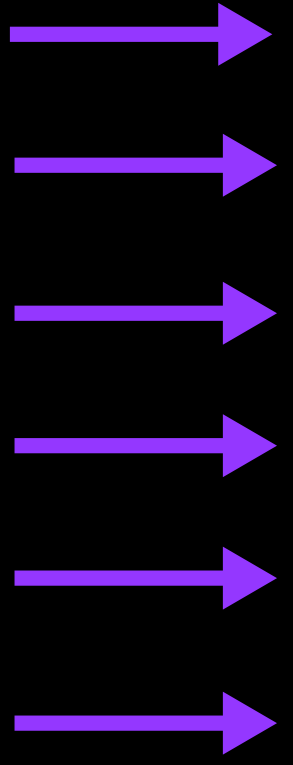
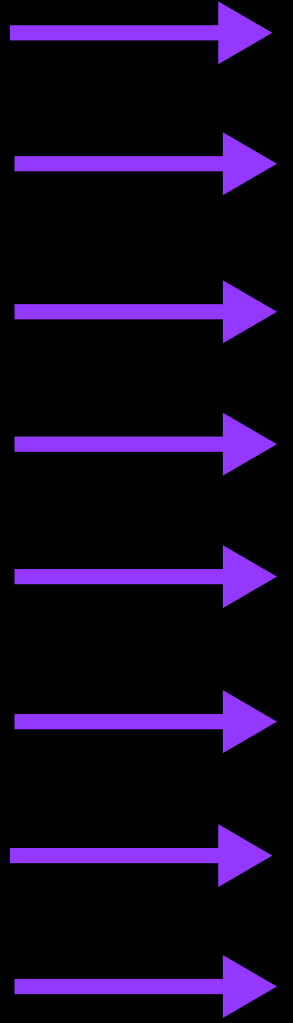
Resolutions a

Resolution	Max FPS
1280 x 1024	1 057
1280 x 720	1 502
1280 x 512	2 111
1280 x 360	2 999
1280 x 240	4 489
1280 x 120	8 923
1280 x 96	11 119
1024 x 768	1 771
1024 x 576	2 359
800 x 600	2 873
800 x 480	3 587
640 x 480	4 436
640 x 360	5 903
640 x 240	8 816
640 x 120	17 424
640 x 96	21 649



≈ 20x fps

Ein weiteres „Nadelöhr“ ist die Pipeline vom Sensor zum Speicher

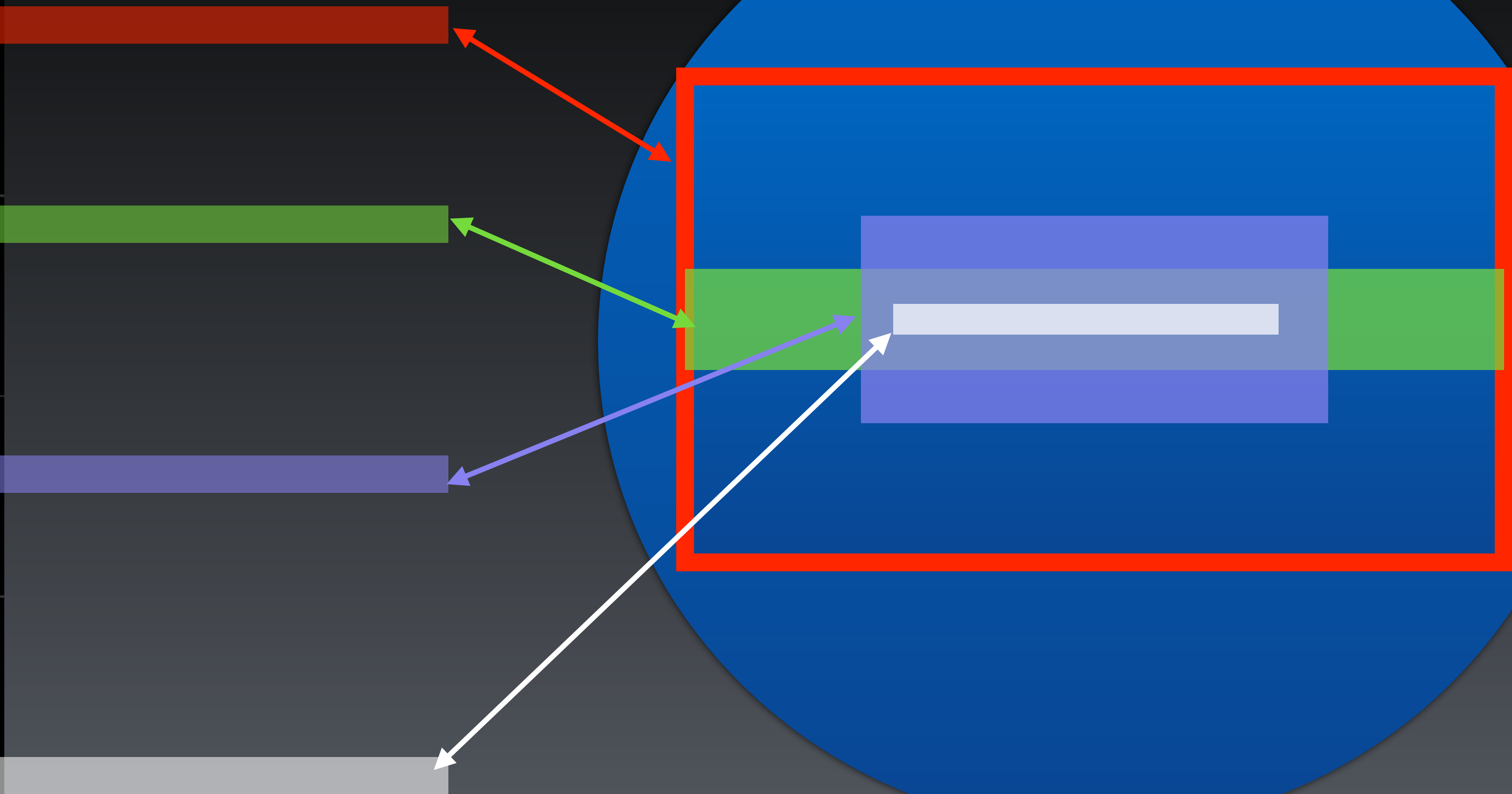


2 bit weniger >>>> ≈ 2x höhere Bildfrequenz!

Die Pipeline-Architektur bedingt die **Form** und **Größe** der ausgelesenen Felder:



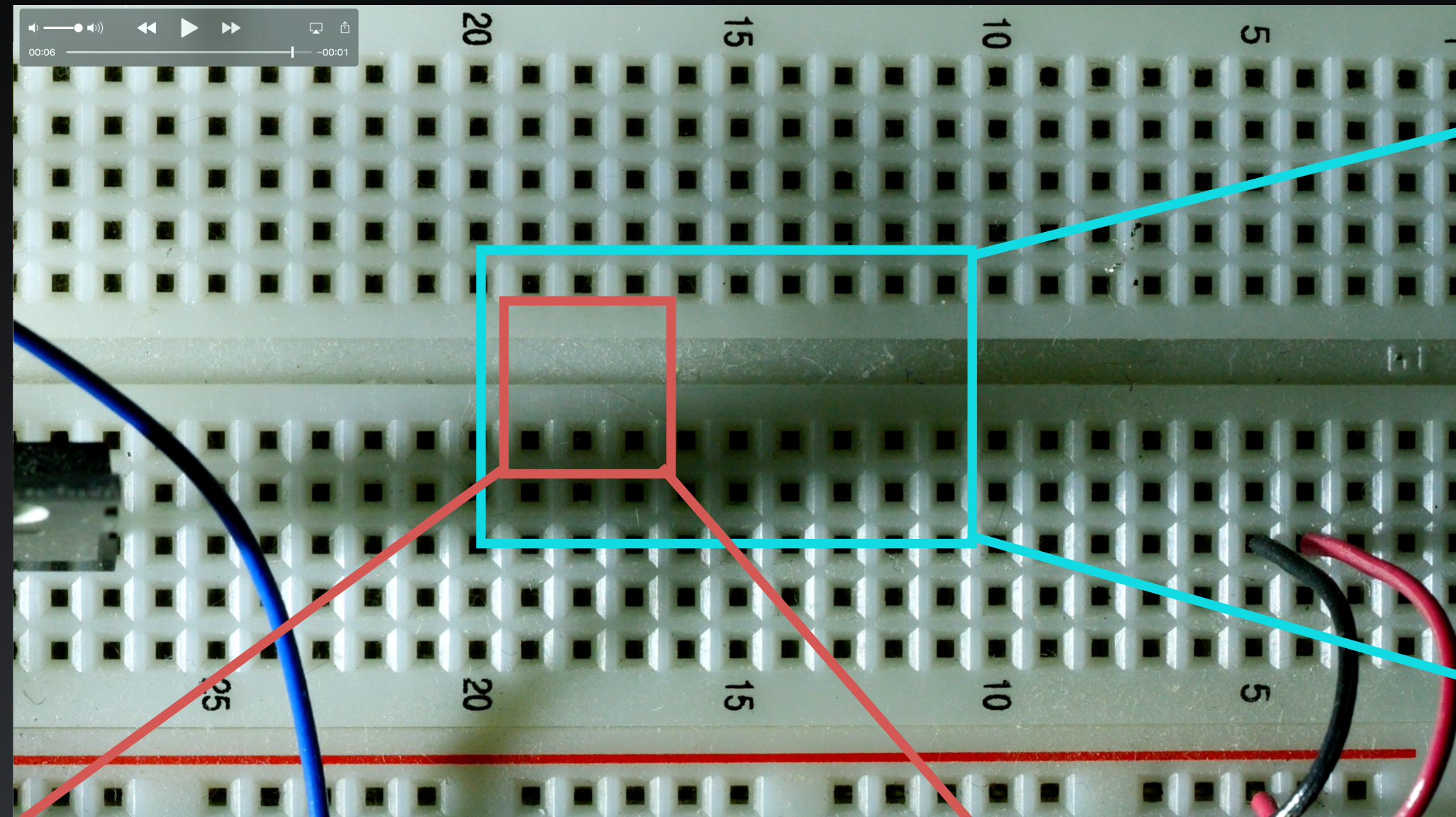
Resolution	Max FPS
1280 x 1024	1 057
1280 x 720	1 502
1280 x 512	2 111
1280 x 360	2 999
1280 x 240	4 489
1280 x 120	8 923
1280 x 96	11 119
1024 x 768	1 771
1024 x 576	2 359
800 x 600	2 873
800 x 480	3 587
640 x 480	4 436
640 x 360	5 903
640 x 240	8 816
640 x 120	17 424
640 x 96	21 649



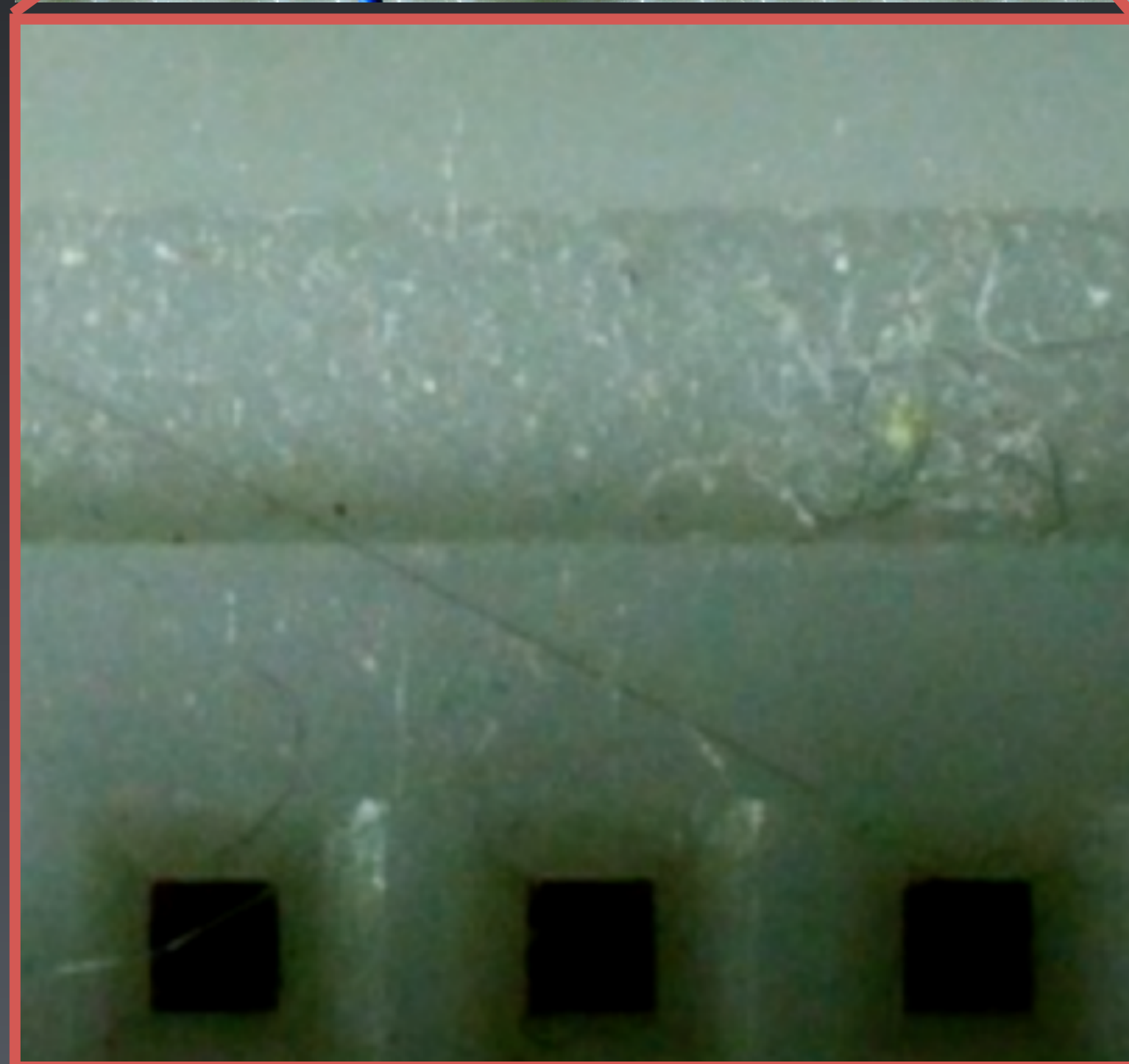
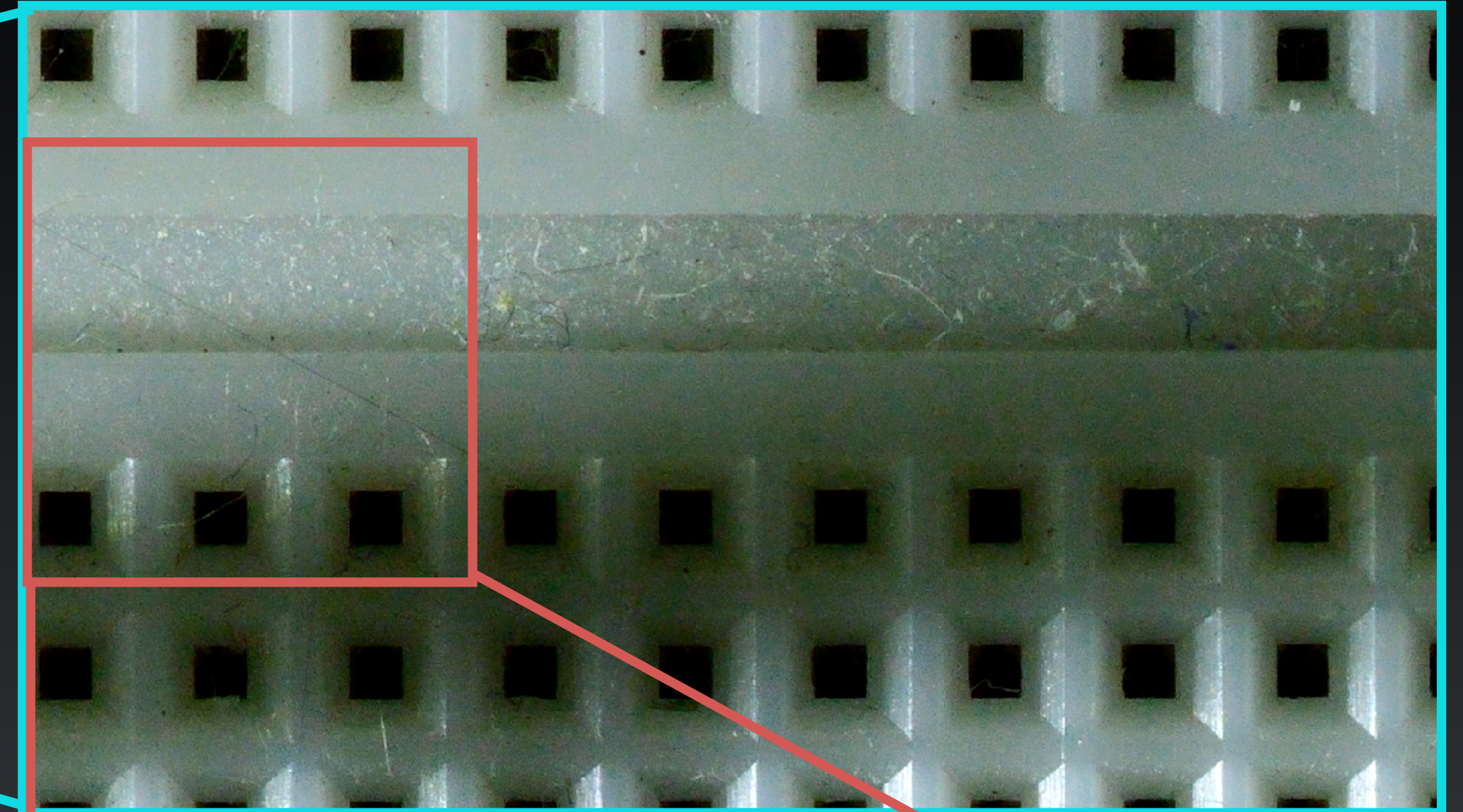
Pixel-Binning und Sensor-Rauschen

(FHD 120fps; 420/10L; ISO 6400, f11, 1/2000) :

Aufnahmemodus 2K : Full (Binning)



Aufnahmemodus 2K : Pixel/Pixel



Crop



Crop

Pixel-Binning und Sensor-Rauschen

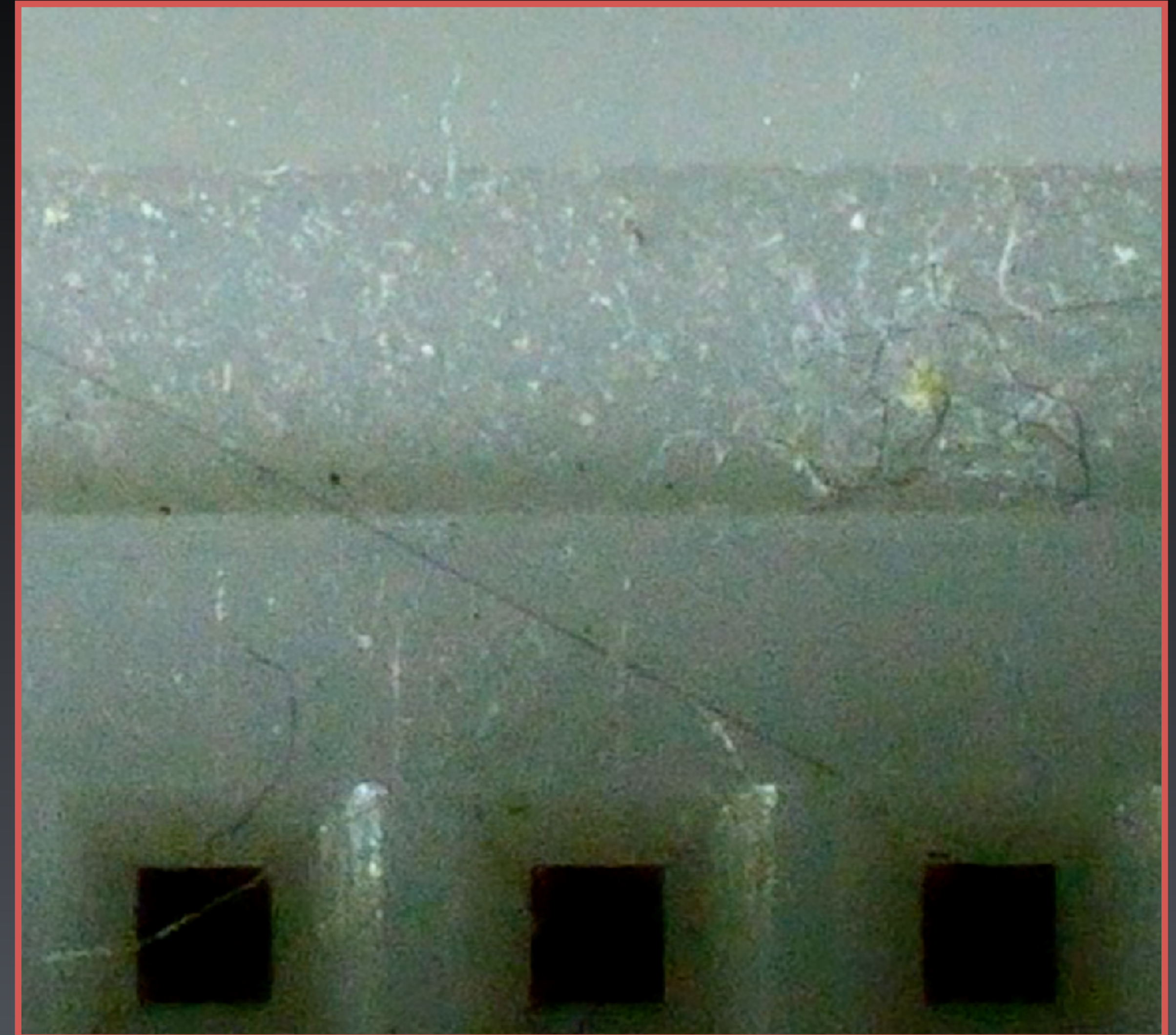
(FHD 120fps; 420/10L; ISO 6400, f11, 1/2000) :

Aufnahmemodus 2K : Full (Binning)

Aufnahmemodus 2K : Pixel/Pixel

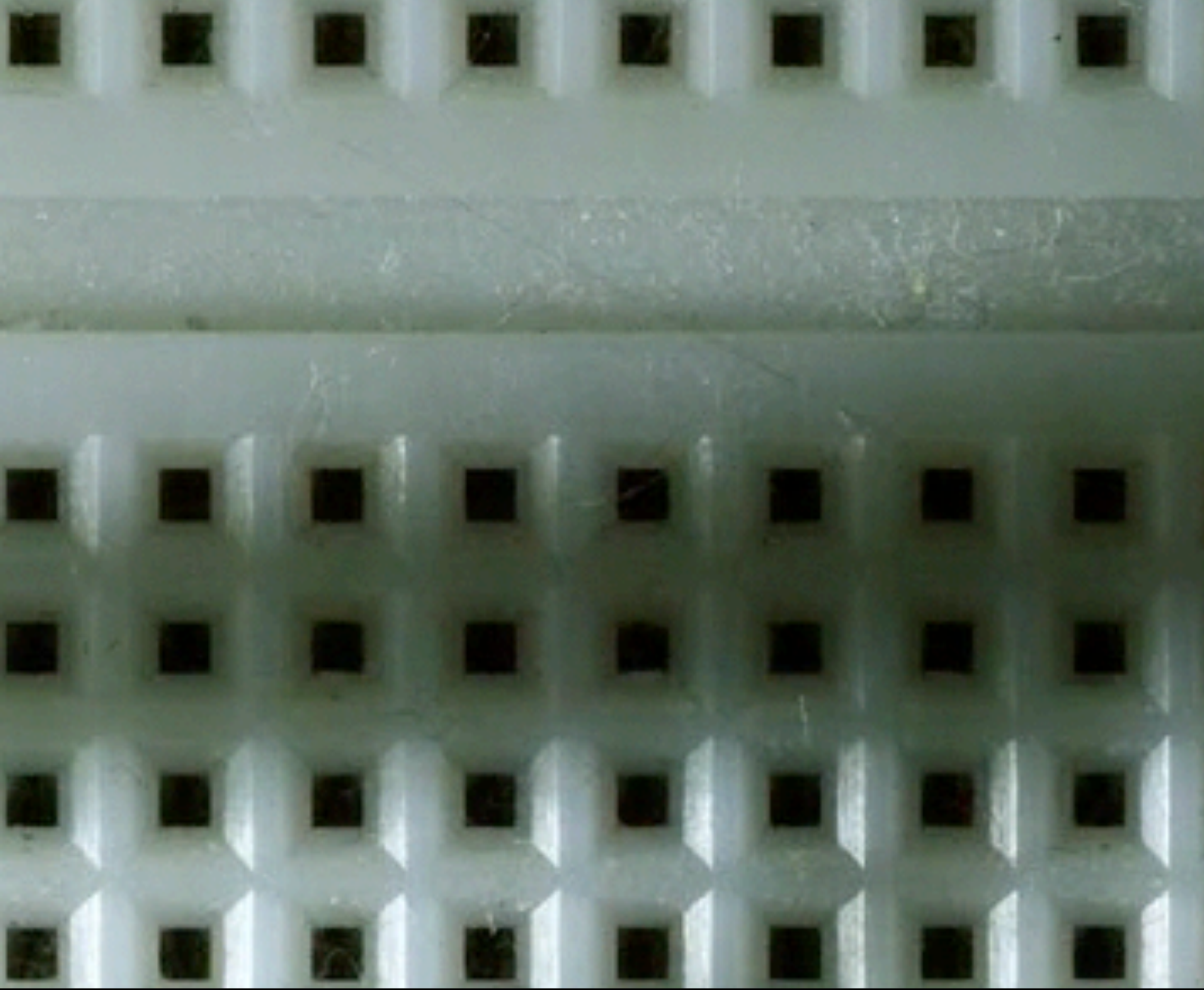


Crop



Crop

Video mit ISO 6400: Das Rauschen ist aufgrund der „vertikalen“, d.h. der Berücksichtigung vieler zeitlich nacheinander aufgenommenen Bilder, im Verhältnis zur Empfindlichkeit (ISO 6400) gering

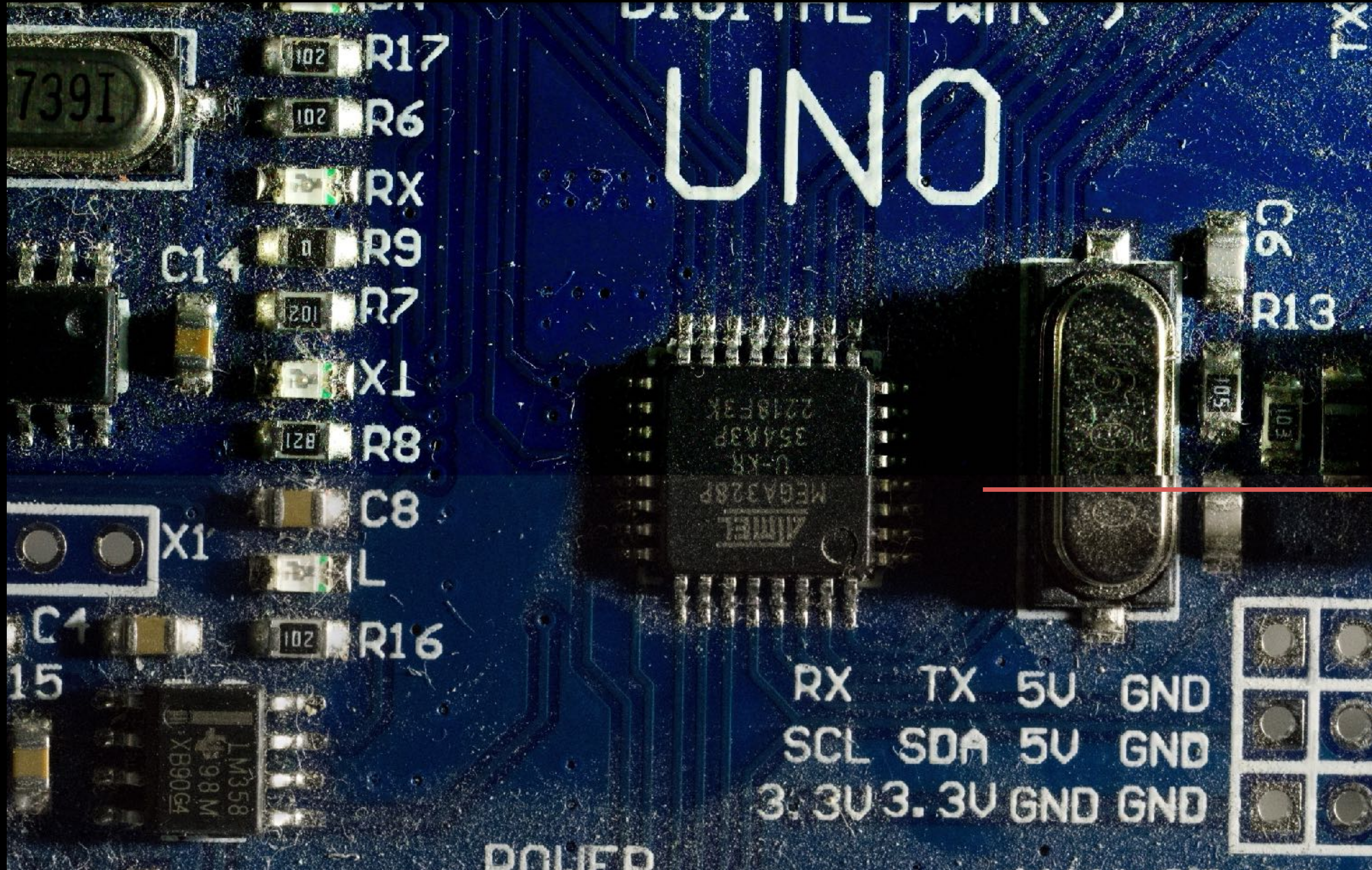


Zum Vergleich: UW-Foto auf Analogfilm (Kodak Ektachrome 400, „gepusht“ auf ASA 800
Straße von Messina (1978)



Wie wird ein „Einzelbild“ aus einem Video extrahiert ?

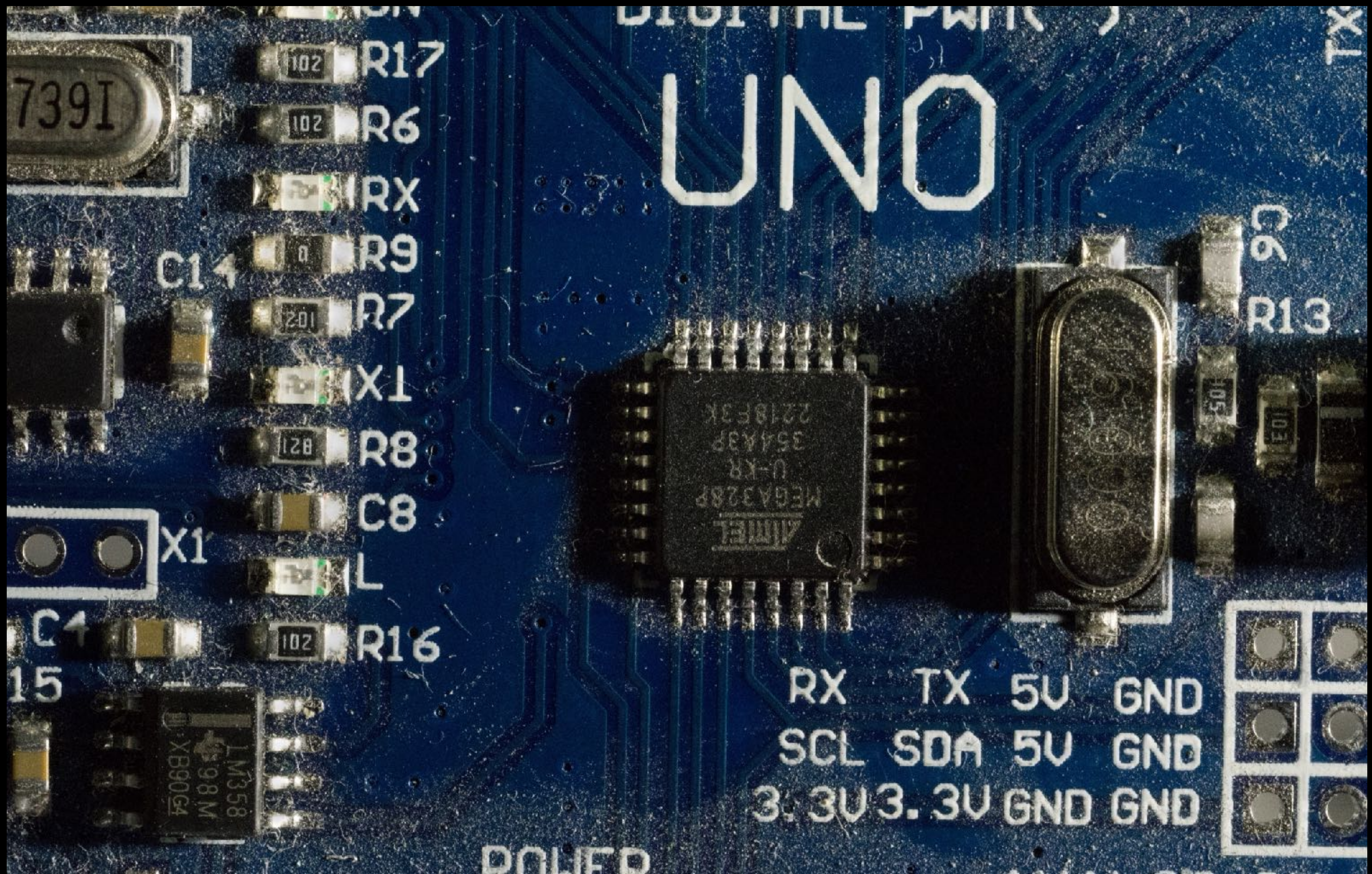
Einzelbild aus Video (Pro Res Raw) vs Einzelfoto (Raw) ISO 6400



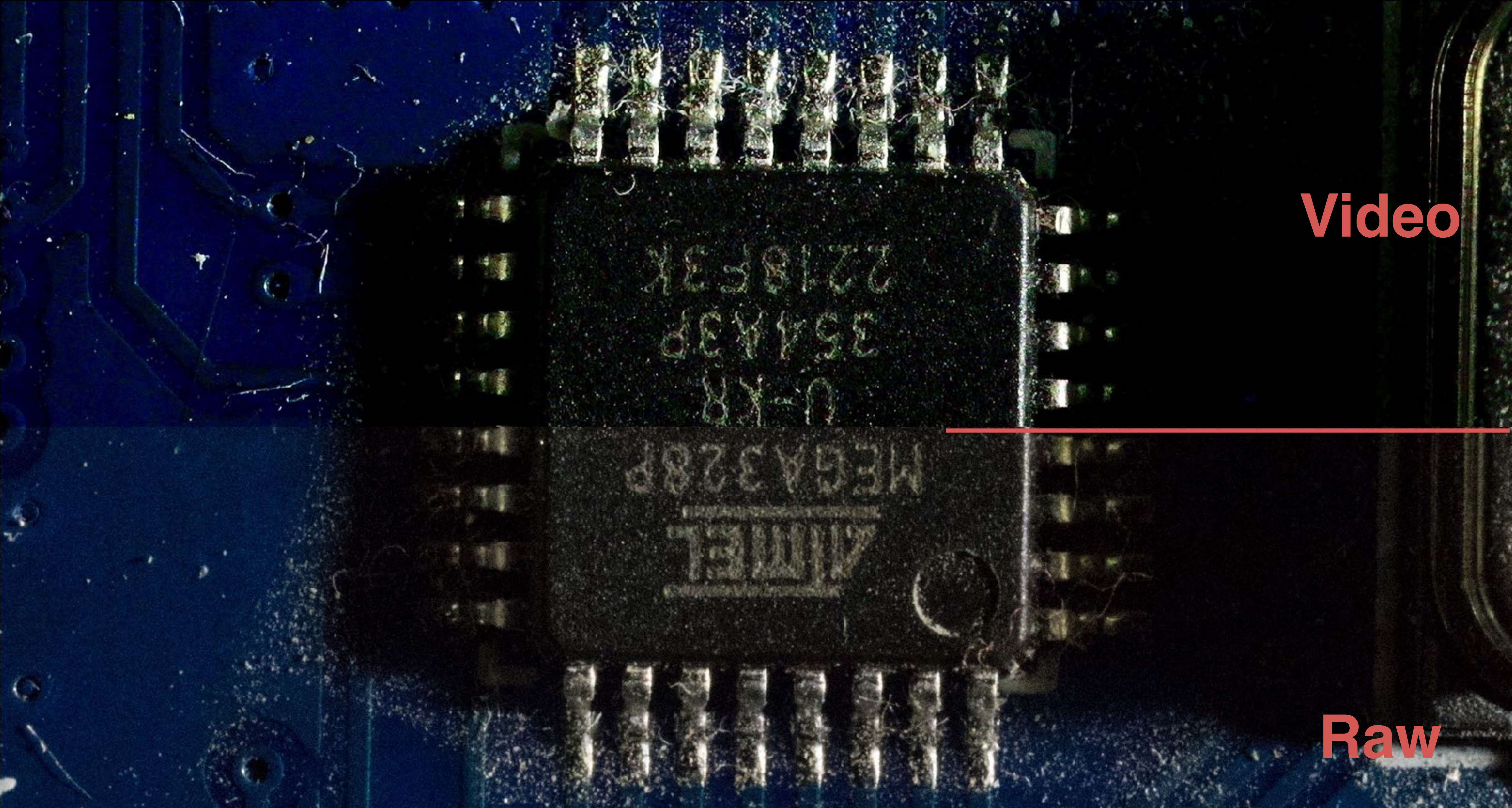
Video

Raw

Einzelfoto (Raw) ISO 6400



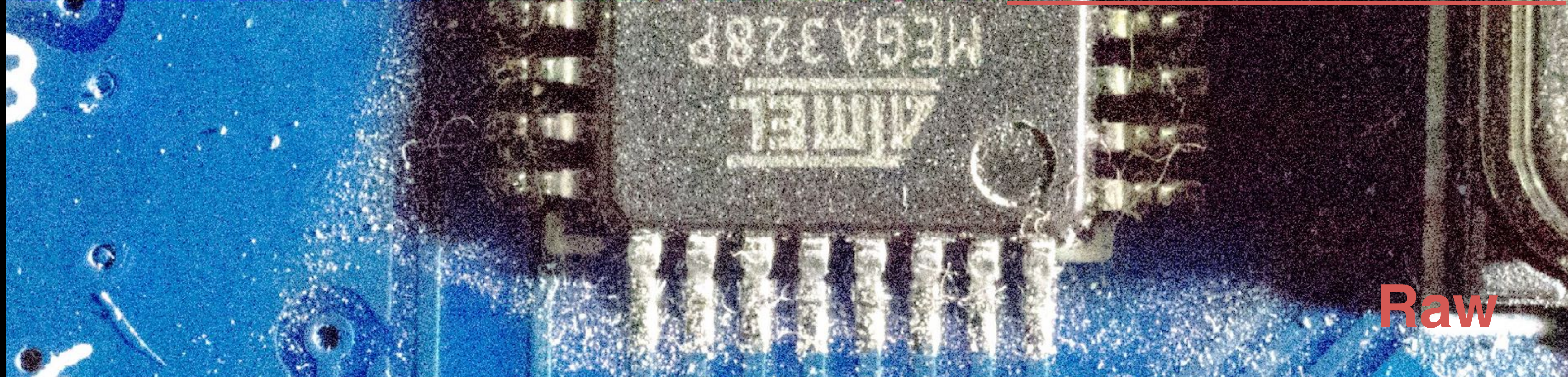
Einzelbild aus Video (Pro Res Raw) vs Einzelfoto (Raw)



Video

Raw

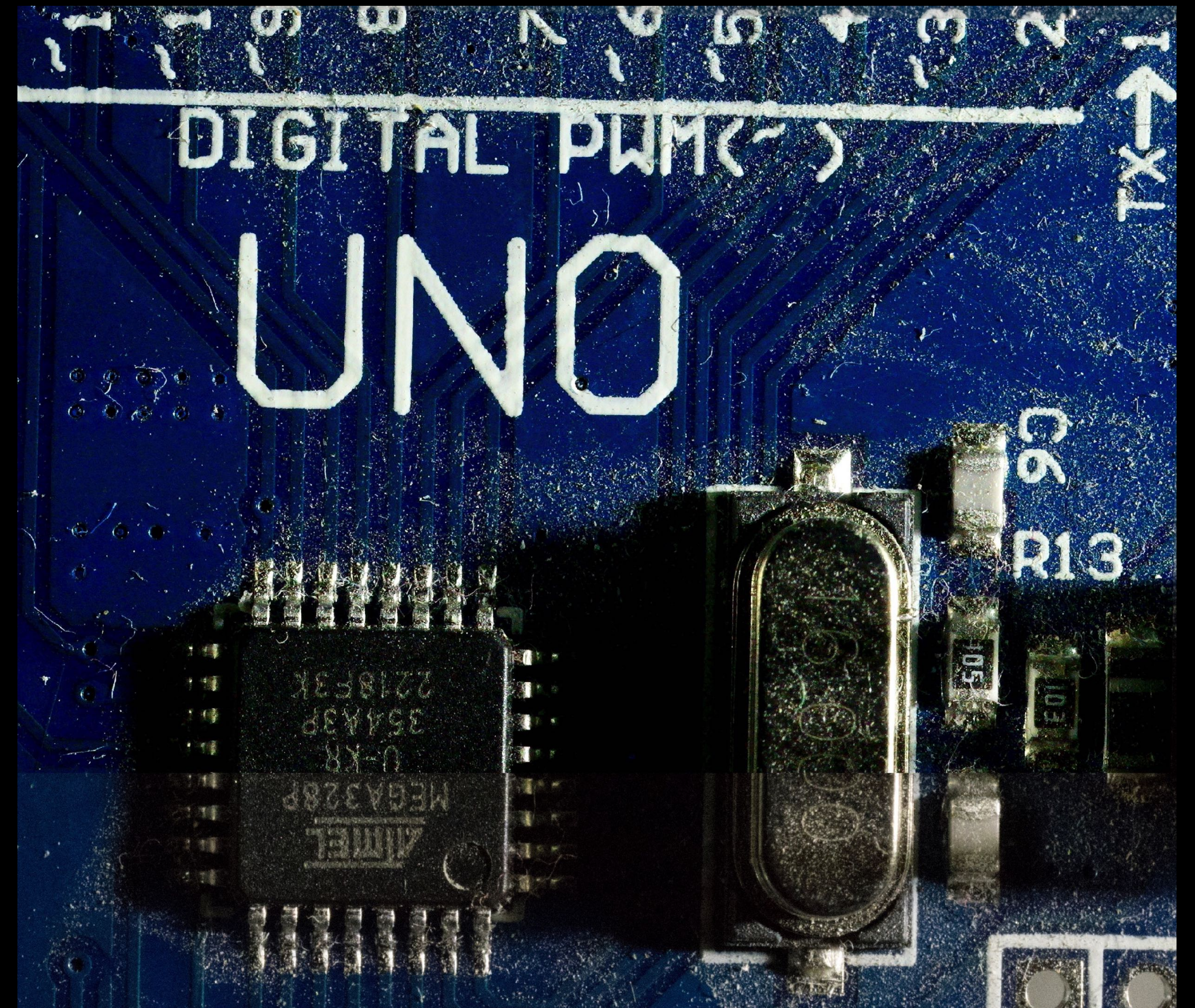
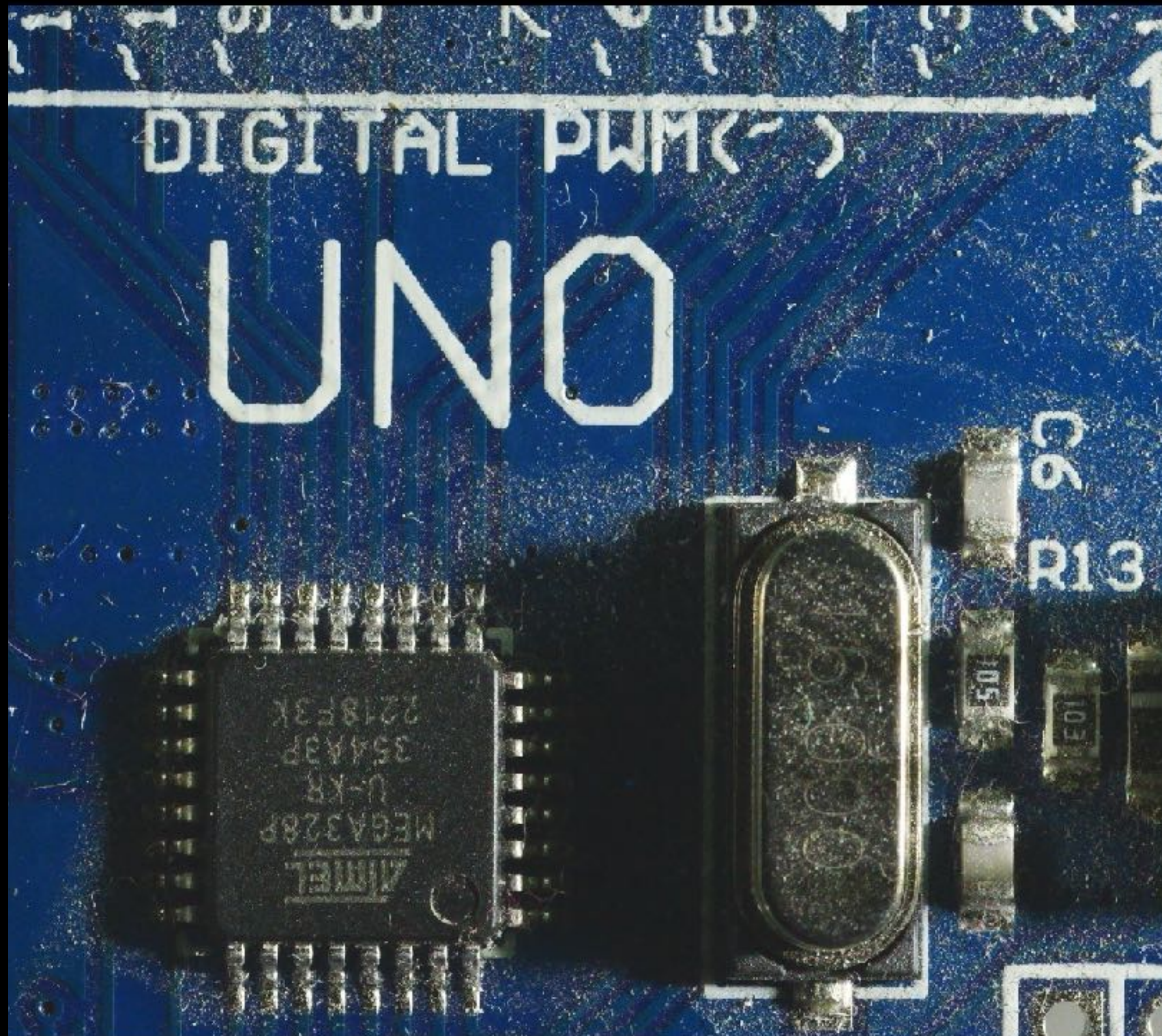
Beim Einzelfoto (14 bit-Raw) lassen sich Details rekonstruieren,
beim Video **(10 bit >> VLC >> png (8 bit))** nicht



DaVinci Resolve ermöglicht eine differenziertere Bearbeitung:

DaVinci: 16 bit TIFF

VLC: 8 bit png



Bei raw Dateien wird ein anderes Farbmodell verwendet als bei Video-Dateien:

raw-Dateien beruhen auf dem RGB-Modell; d.h. jedes Bildelement (Pixel) ist in Form von ausschließlich **einem !!!** 1 Farbwert (jeweils RGB) und der Speicheradresse codiert. Diese Datei wird durch „demosaicing“ in beispielsweise ein RGB-Bild mit RGB-Pixeln umgesetzt

Bei Video-Dateien sind die „Pixel“ eines jeden Bilds aus Helligkeits- und Farbwerten mit unterschiedlicher Bit-Tiefe zusammengesetzt.

Video-Dateien sind in Consumer-Kameras grundsätzlich immer komprimiert.

Bei raw-Dateien >> tiff-Bildern wird das RGB-Farbmodell verwendet



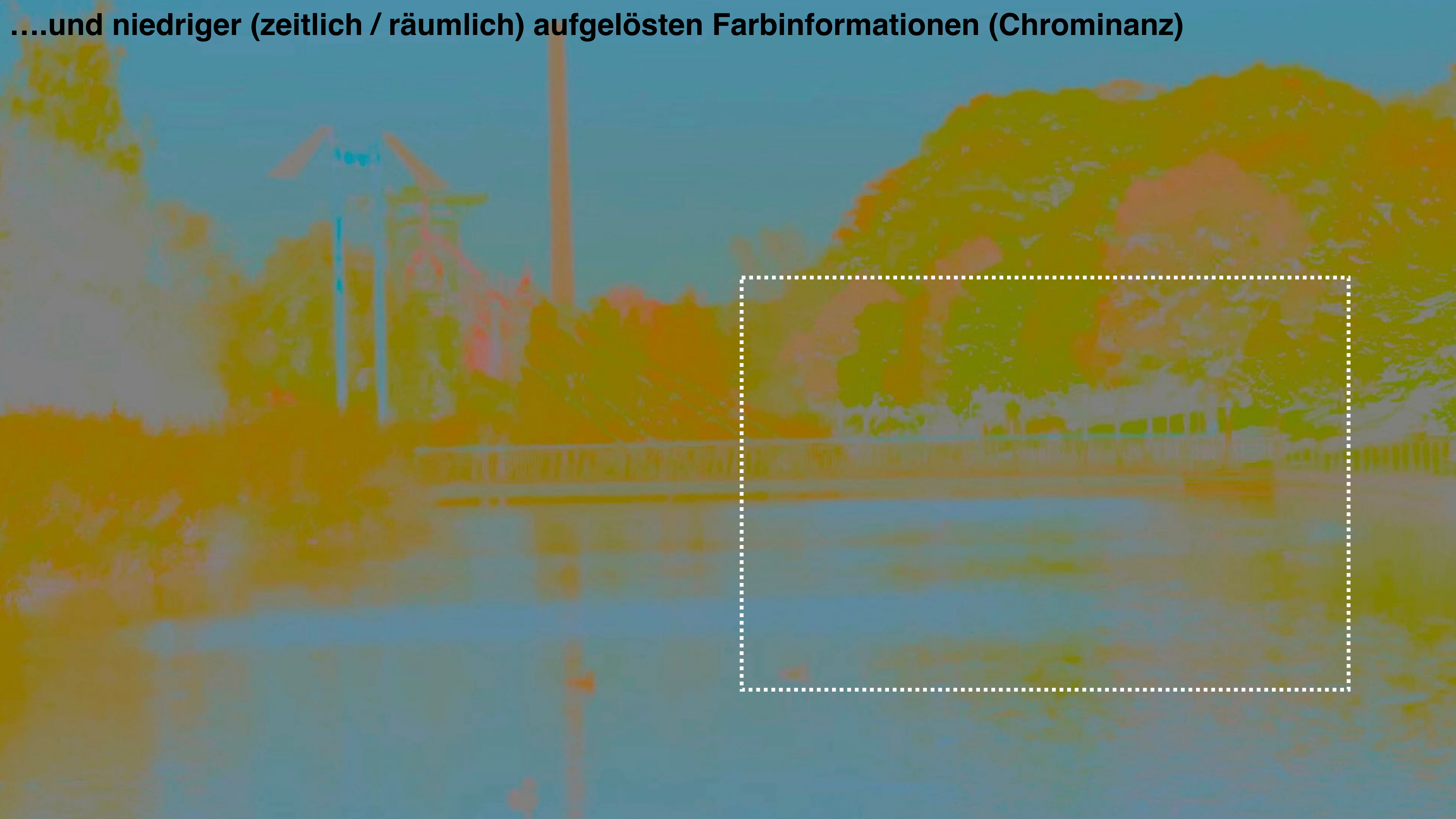
Beim RGB-Farbmodell ist jedes Bildelement (Pixel) in 3 Farbwerten (RGB) codiert





Beim Video-Farbmodell besteht jedes Bild aus hochaufgelösten Grauwerten (Luminanz).....

....und niedriger (zeitlich / räumlich) aufgelösten Farbinformationen (Chrominanz)



....und niedriger aufgelösten Farbinformationen:

keine Einzelheiten erkennbar

>>> Datenreduktion !!!



Die Re-Kombination des Grauwertbilds mit der Farbinformation ergibt ein scharfes Bild



Geht auch mit GIMP!!!

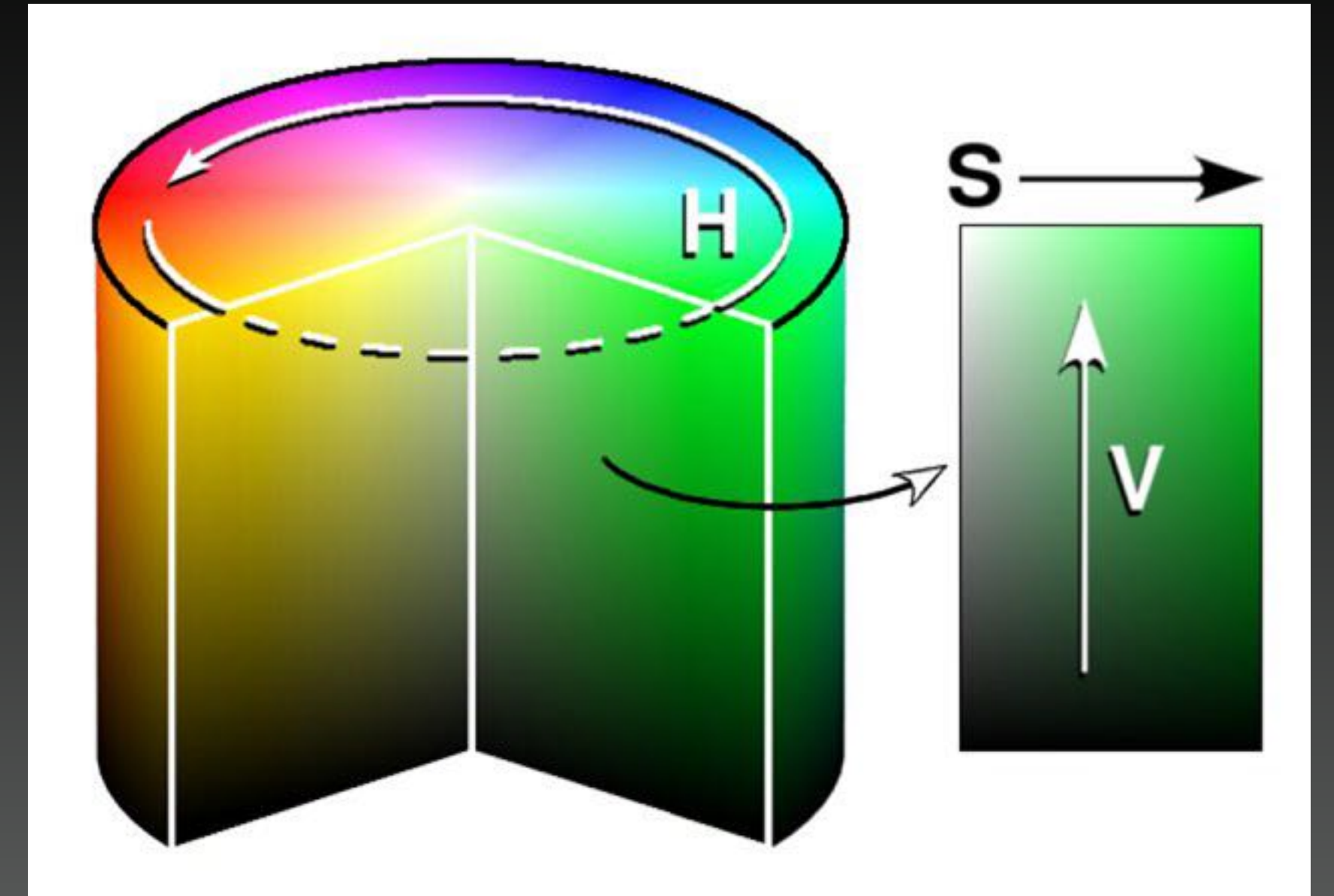
Die Farbinformation wird beim Video oft durch das **HSV**-Modell beschrieben

H: hue (Farbwert / Farbigkeit)

S: saturation (Sättigung)

V: value (Helligkeit von 0% bis 100%)

Dieser Wert steckt dann in dem Grauwert



Quelle: Wikipedia



Farbeditor von DaVinci Resolve

Die Kennzeichnung der **Farb**unterabtastung sagt nichts über die Bit-Tiefe eines Videos bzw. daraus extrahierter Bilder aus!

[FHD/240p/422/10-I]	✓	✓		1920×1080	16:9	239.76p	800	AVC
[FHD/240p/422/10-L]	✓	✓		1920×1080	16:9	239.76p	200	AVC

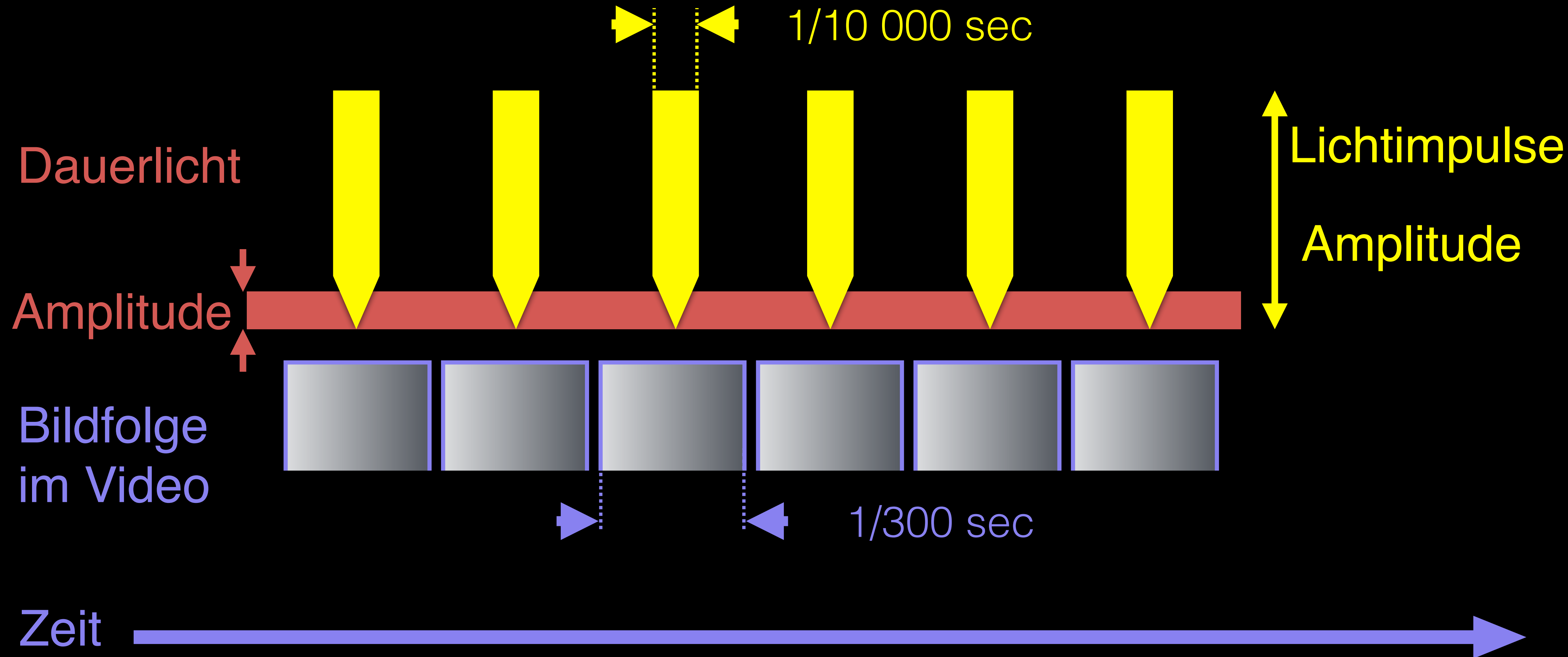
4:2:2



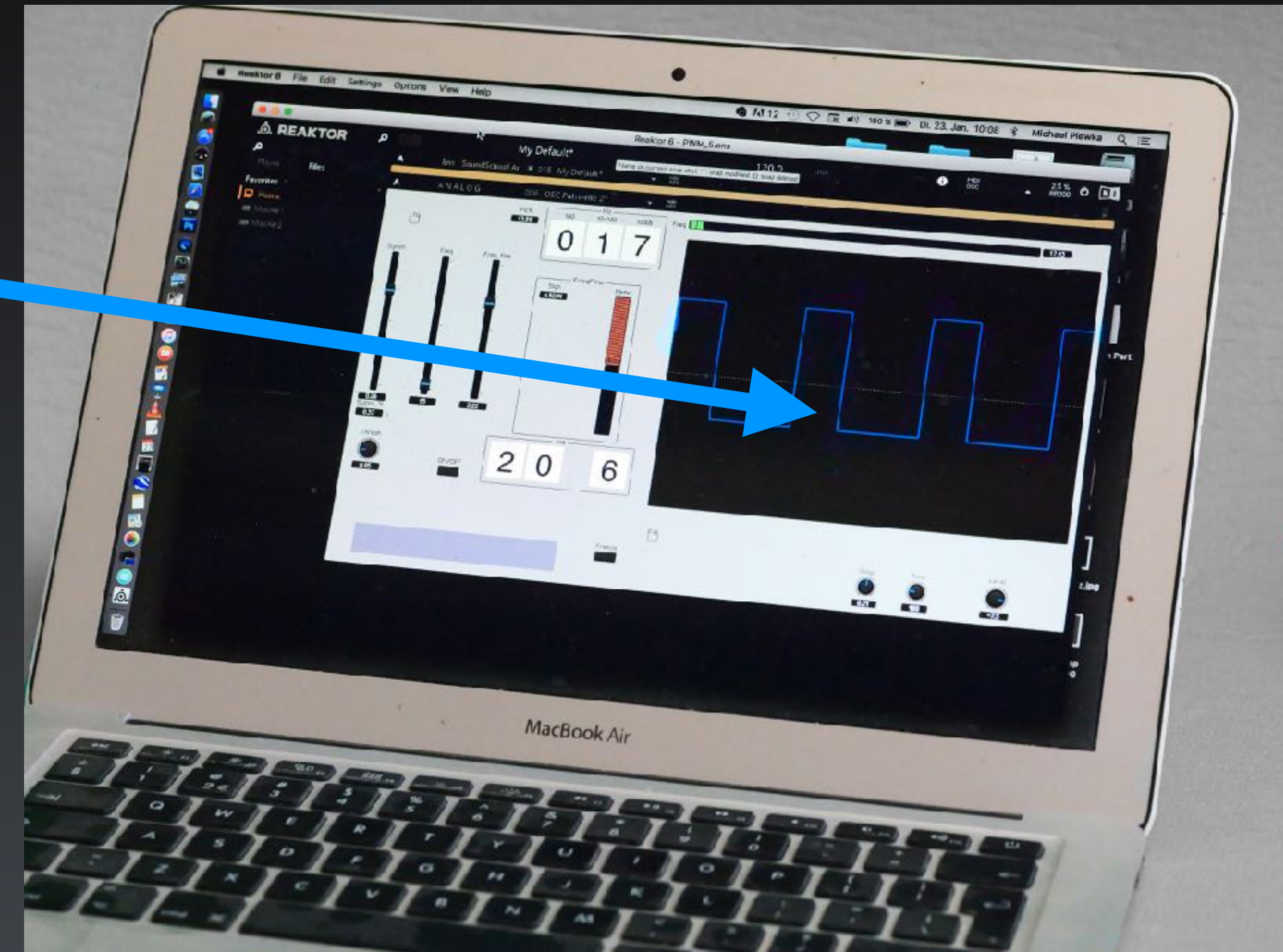
Codierung der Amplituden- und Farbinformation:

Verhältnis der Amplitudeninformation zur **Farbunterabtastung 1. Pixelblock** und **Farbunterabtastung 2. Pixelblock**

Vor-Überlegungen zur Beleuchtung: Dauerlicht vs. gepulste LED



kann man mit Lichtimpulsen statt kontinuierlichem Licht arbeiten?

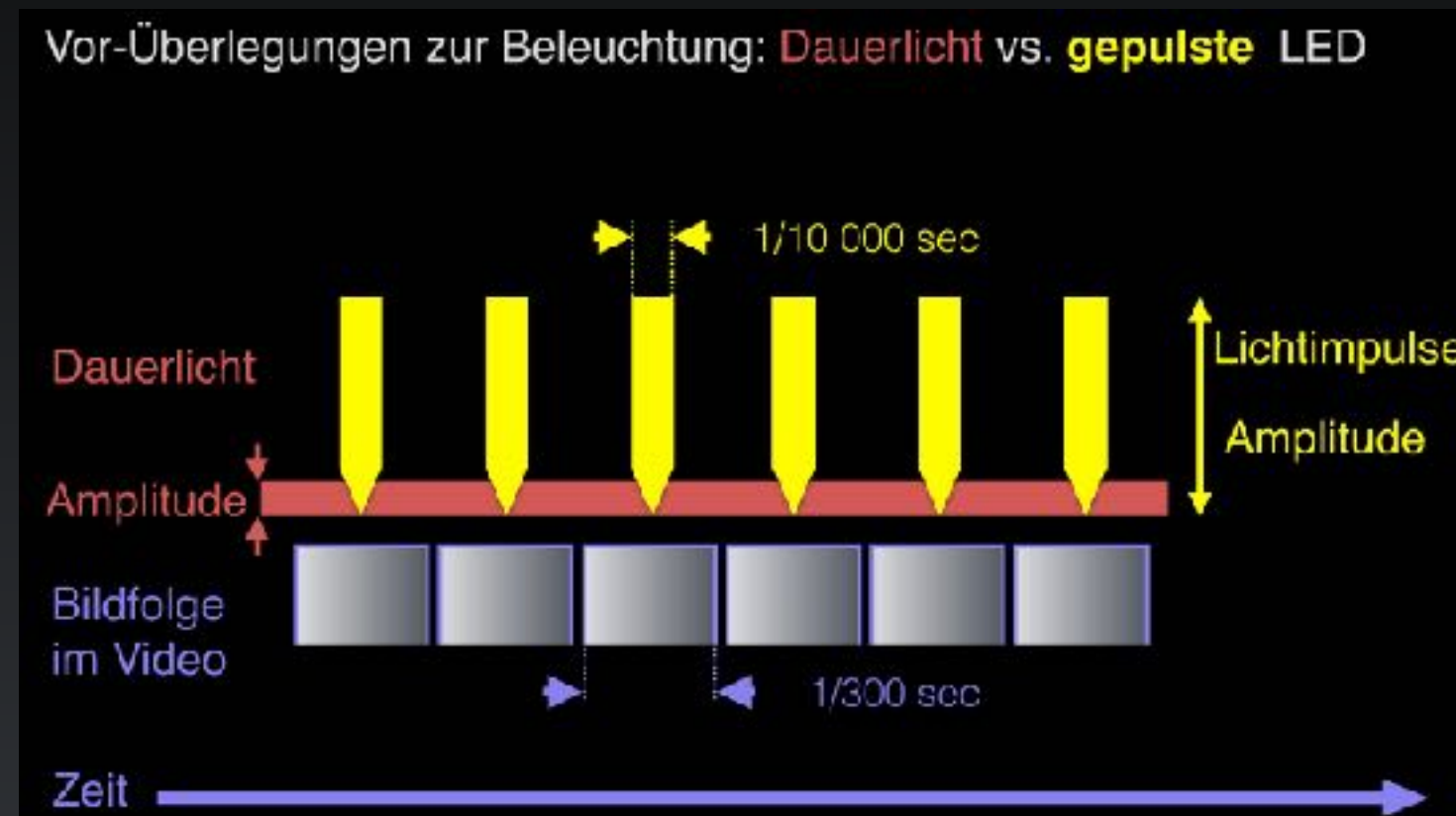


Synchronisation über SMPTE:
(noch) **nicht gelöst**



Chronos-Kameras bieten
frei programmierbare
Trigger-Möglichkeiten
für die Synchronisation

Das zuvor angesprochen Problem der Synchronisation der Impulsbeleuchtung stellt sich nur bedingt, weil manche Videokameras **kürzere Belichtungszeiten** zulassen als diejenigen, die sich aus der **Bildfrequenz** allein ableiten lassen würden





Pro

- hohe Bildfrequenz > 1000 - 21000 fps
- kann an Mikroskop adaptiert werden
- Viele Trigger-Möglichkeiten
- 12 bit raw-Video als Einzelaufnahmen-Sequenz
- Software ziemlich frei konfigurierbar
- Bildmonitoring über HDMI

contra

➔ Beleuchtungsproblem am Mikroskop ???

Sensorgöße „nur“ FHD

ISO 500-8000

➔ max 11 sec kontinuierlicher Aufnahmezeit

(>>> Ringpuffer/-speicher)



Pro

kann an Mikroskop adaptiert werden

Schwenkmonitor

Sensorgöße 25Mpix

ISO 100- 25600

➔ beliebige Aufnahmezeit (keine thermischen Probleme!)

Bildmonitoring/ Pro-Res-Aufnahme über HDMI

➔ Blitzaufnahmen (weiterhin) möglich

contra

niedrigere Bildfrequenz ≤ 300 fps

Triggermöglichkeiten eingeschränkt

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Fakten lassen sich mit einer handelsüblichen Kamera und wenig aufwendiger Beleuchtung Zeitlupenaufnahmen an Mikroorganismen machen bzw. dokumentieren.

Dabei werden anschließend Beobachtungen vorgestellt, die mit folgenden Eckdaten aufgenommen wurden:

Beleuchtung: Cree XHP 70.2 12V 1000mA >>> 2000 lm

Kontrast: DIC

Video: **FHD** (≈ 2 Mpix!!!) 180 fps ISO 1600 (GH5) >>> Zeitlupe ≈ 7x

FHD (≈ 2 Mpix!!!) 300 fps ISO 3200 (GH6) >>> Zeitlupe ≈ 12x

Editor: DaVinci Resolve (kostenlose Version, sehr komplex; Manual: > 4000!!! Seiten)
>>> Bild-Ausschnitte; Video-Schnitt, Bildkontrast, Schärfe