Kapitel 2

Klassische Kamerasysteme für Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Vielfalt der verschiedenen Kamerasysteme für die Hochgeschwindigkeitsanwendungen ist geprägt durch die historische Entwicklung, angefangen mit ersten Modifikationen der Filmkameras bis hin zu Kameras mit Halbleiter-Bildsensorbauelementen. Um die Problematik der Hochgeschwindigkeitskinematographie und ihre Anforderungen zu verstehen, sowie die Richtungen für mögliche Weiterentwicklungen, vor allem in Hinblick auf eine Standard-CMOS-Technik bestimmen zu können, präsentiert dieses Kapitel eine Kurzfassung der wichtigsten klassischen realisierten Systeme mit ihren typischen Vertretern wie z.B. opto-mechanische Systeme, elektro-optische Systeme und Systeme mit kurzer Ausleuchtung. Dabei werden im folgenden Überblick die wichtigsten verwendeten Methoden der Kamera für hohe Bildraten mit einem Rückblick auf die bestimmten Anwendungszwecke vorgestellt. Hier werden Kameras für die Einzelbildaufnahme, Kameras für die Aufnahme von Bildsequenzen (Framing-Kameras) und Kameras für die Aufnahme eines eindimensional ablaufenden Ereignisses (Streak-Kameras) näher betrachtet.

2.1 Opto-Mechanische Systeme

Die opto-mechanischen Systeme stellen die ersten Typen der Hochgeschwindigkeitskameras dar, die während der zwanziger Jahre bzw. nach dem zweiten Weltkrieg entwickelt worden sind. Sie haben alle einen Film als Speichermedium, wobei sie verschiedene mechanische Mechanismen für ihren Betrieb benutzen.

Als einfachste Kamera für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ist eine modifizierte Filmkamera verwendet worden. Während sich der Film von einer zur anderen Rolle bewegt, wird die aufzunehmende Szene über die Optik auf den Film projiziert und mittels einer periodisch

getriggerten Blende wird der Film belichtet. Der begrenzende Faktor für die maximal erzielbare Bildrate von ca. 300 bis 400 Bilder/s ist durch das Filmmaterial selbst bestimmt, da bei zu starken Beschleunigungen der Film zerreißt.

Um dieses Problem zu umgehen und höhere Bildraten zu erzielen, kann die Kamera durch den Einbau eines rotierenden Prismas modifiziert werden. Die Projektion der aufzunehmenden Szene durch dieses rotierende Prisma auf den Film führt dazu, daß die Geschwindigkeit, mit der sich der Film bewegt, reduziert werden kann. Dies geschieht, indem aufgrund der Brechung des Lichtes eine Verschiebung der projizierten Szene in die gegenläufige Richtung des bewegenden Filmes erzeugt wird (siehe Abbildung 2.1). Gleichzeitig gewährleistet das Prisma durch Öffnungen in seinem Metallgehäuse eine Shutter-(Verschluß)-Funktion. Für den stabilen Betrieb werden teure Elektromotoren mit guter Beschleunigung und gut kontrollierbarer Geschwindigkeit benötigt.

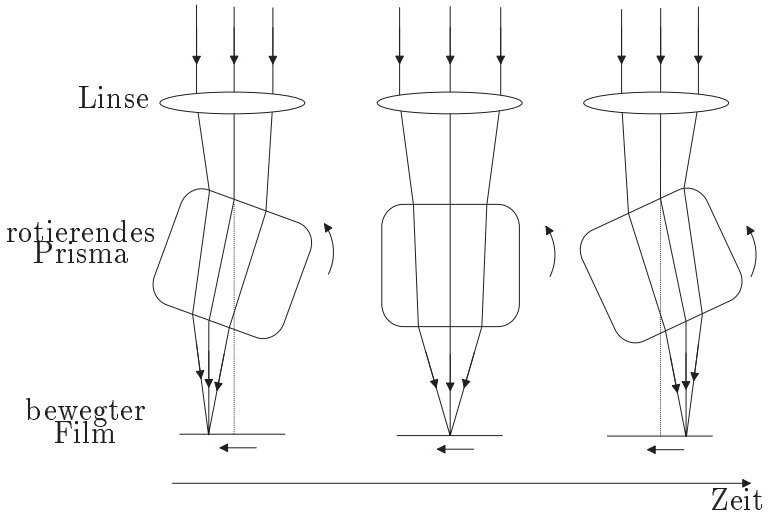

Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau der Framing Kamera mit rotierendem Prisma.

Dieses Prinzip der Bildakquisition bei hoher Bildrate leidet unter einer Szenendefokussierung und Auflösungsreduktion aufgrund der Aberration, die wegen des schräg positionierten Prismas entsteht. Trotz der Maßnahmen für eine Verbesserung der Bildqualität [3] muß ein Kompromiß zwischen einerseits ausreichender Schärfe und räumlichen Auflösung und andererseit zwischen zeitlicher Auflösung bzw. Bildrate gefunden werden. In der Standardausführung erreichen diese Kameratypen Bildraten von bis zu ca. 3000 Bilder/s.[1]

Die Problematik der Filmkameras bezüglich ihrer maximalen Beschleunigung bzw. Geschwindigkeit wird durch den Einsatz von Kameras, bei denen sich der Film nicht bewegt, gelöst. Ein Beispiel dafür ist eine Kamera mit rotierendem Spiegel, bei der für eine Standardanwendung, d.h. für die Aufnahmen von Bildsequenzen („framing camera“), die aufzuneh-

[1] Eine speziell ausgeführte Kamera, die den jetzigen Marktführer in dieser Kameraklasse darstellt, kann bis zu 40000 Bilder/s auf 16mm Film aufnehmen [4].

mende Szene auf den kreisförmig gelegten Film projiziert wird. Dies geschieht, indem die Szene über eine Eingangsoptik auf den rotierenden Spiegel gelangt, davon reflektiert wird und über eine Linse der sekundären Linsenkette (abhängig von der Lage des rotierenden Spiegels) auf den Film projiziert wird. Das Zentrum des kreisförmig plazierten Filmes sowie der zweiten Linsenkette liegt dabei genau auf der senkrecht liegenden Achse des rotierenden Spiegels. Eine prinzipielle Darstellung der Kamera mit rotierendem Spiegel ist in Abbildung 2.2 gezeigt.

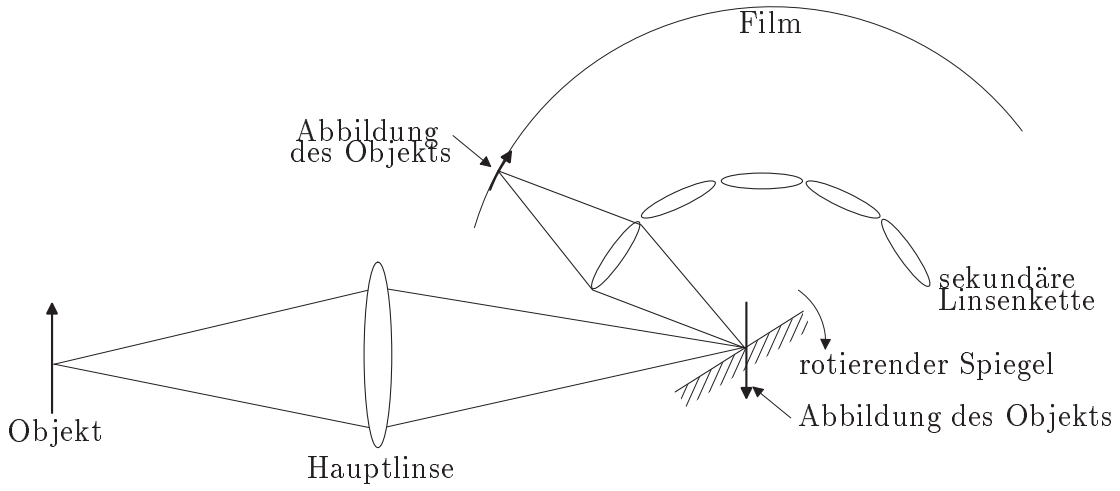

Abbildung 2.2: Prinzipieller Aufbau der Framing-Kamera mit rotierendem Spiegel.

Bei diesem Kameratyp gibt es einige Probleme, deren Lösungen ebenso kompliziert und aufwendig sind. Zum einen ist ein Motor notwendig (meistens als Gasturbine oder als Elektromotor realisiert), der eine ausreichend hohe Beschleunigung hat und dessen Geschwindigkeit während des Betriebs bei den geforderten Bildraten stabil bleibt. Das Problem der Vibrationen des Systems muß vermieden werden, indem die Eigenfrequenzen des Systems mit dem Motor abgestimmt werden. Die Eigenfrequenzen, die Vibrationen auslösen, müssen so liegen, daß sie bei großer Beschleunigung des Motors schnell durchlaufen werden. Weitere Aspekte, wie z.B. die für eine gute Bildqualität notwendige Spiegelgröße bzw. die Festigkeit des Spiegels, müssen ebenso berücksichtigt werden. Für die Shutterfunktion werden in der Regel zwei komplexe Verschluß-Mechanismen verwendet, zum einen ein mit einem Solenoid betriebener Aufsatz des Verschlußes auf dem Lichtweg („capping shutter“) oder aber ein sog. Riß-Shutter („shatter shutter“). Der Riß-Shutter, der aus einer in einem Metallgehäuse angebrachten Glasscheibe besteht, funktioniert, indem mittels eines elektrischen Zünders eine Änderung in der Glasoberfläche hervorgerufen wird und den Weg für das Licht entweder gesperrt oder geöffnet wird.

Eine Kamera mit rotierendem Spiegel kann auch als Streak-Kamera realisiert werden. Solche Streak-Kameras können dann eingesetzt werden, wenn man Änderungen in nur einer Richtung beobachten möchte. Zu diesem Zweck wird über einen Schlitz nur ein schmaler

Teil des Bildes auf den rotierenden Spiegel und entsprechend weiter auf den Film projiziert. Das Verfahren ähnelt der Funktion eines Scanners, da die zeitkontinuierliche Projektion der sich schnell ändernden Szene über das beschriebene Linsensystem auf den Film abgebildet wird.

Mit diesem Kameratyp ist es möglich, eine sehr hohe Geschwindigkeit zu erzielen und zwar ca. 10^7 Bilder/s in Standardausführung bzw. bis ca. 10^9 Bilder/s bei Streak-Kameras. Allerdings sind neben den schon erwähnten Problemen der Kamera mit rotierenden Spiegeln noch eine geringe Anzahl der aufnehmbaren Bilder, sowie eine Empfindlichkeit, die deutlich kleiner als bei elektro-optischen Systemen ist, zu berücksichtigen.

Unter den opto-mechanischen Kameras hat noch die Trommelkamera Aufmerksamkeit erweckt, bei der ein Streifen des Filmes auf eine rotierende Trommel aufgebracht wurde. Das Linsensystem erzeugt das Bild auf einer festen Position und der Film passiert diese Lage, so daß die aufzunehmende Szene vom Film abgetastet wird. Die Trommelkameras werden ausschließlich als Streak-Kamera realisiert und erzielen eine Bildrate von 10^8 Bilder/s.

Opto-mechanische Systeme wurden in den letzten Jahrzehnten kaum weiter entwickelt. Dies ist auf die Tatsache zurückzufuhren, daß physikalische Grenzen der benötigten Materialen bezüglich ihrer Zerreißfestigkeit erreicht wurden. Außerdem wurden zu hohe Kosten durch die komplizierten Mechanismen wie z.B. Shutterrealisierung, präzise Motoren usw. verursacht, um diese Systeme rentabel herzustellen.

2.2 Elektro-Optische Systeme

Seit Anfang der fünfziger Jahre findet die Entwicklung sog. elektro-optischer Hochgeschwindigkeitskamerasysteme statt. Sie verwenden in der Regel verschiedene Bildröhren für die Akquisition der aufzunehmenden Szene. Bei diesen Systemen vereinfacht sich im Vergleich zu den vorher beschriebenen opto-mechanischen Systemen deutlich der Aufbau der Kameras durch das Wegfallen von einigen komplizierten mechanischen Komponenten. Außerdem wird neben den erzielten höheren Bildraten eine deutlich höhere Empfindlichkeit aufgrund der eingesetzten Photoschichten und zusätzlicher Beschaltung zur Signalverstärkung innerhalb der Bildröhren erreicht. Zugleich sind kurze Belichtungszeiten und hohe Bildraten durch einfachere und zuverlässigere Realisierungen der Shutterfunktion im Vergleich zu den opto-mechanischen Systemen möglich.

Im allgemeinen können diese Kamerasysteme in vier verschiedene Klassen unterteilt werden: Kameras für die Aufnahme von Einzelbildern, Kameras für die Aufnahme von Bildsequenzen (Framing-Kameras), Streak-Kameras und Röntgenkameras.

Die Hochgeschwindigkeitskameras für die Aufnahme von Einzelbildern werden überwiegend

durch nah-fokussierte Diodenröhren realisiert, die eine photoemissive Schicht oder eine Fotokathode hinter der am Eingang liegenden transparenten Glasschicht sowie einen Leuchtschirm oder einen Film an ihrem anderen Ende haben. Wird ein hoher elektrischer Impuls (10kV) zwischen dem Leuchtschirm und der Fotokathode erzeugt, kann eine Shutterfunktion realisiert werden. Um die Empfindlichkeit der Röhren deutlich zu erhöhen, werden Mikrokanalplatten für die Signalverstärkung verwendet. Solche Röhren sind nicht nur als nahfokussierte Diodenröhren, sondern auch als Multi-Elektroden realisiert. In beiden Fällen ist eine Shutterfunktion entweder durch Ansteuerung mit hochenergetischen Pulsen zwischen einer Elektrode und der Mikrokanalplatte oder durch das direkte Pulsen von Mikrokanalplatten realisierbar [5].

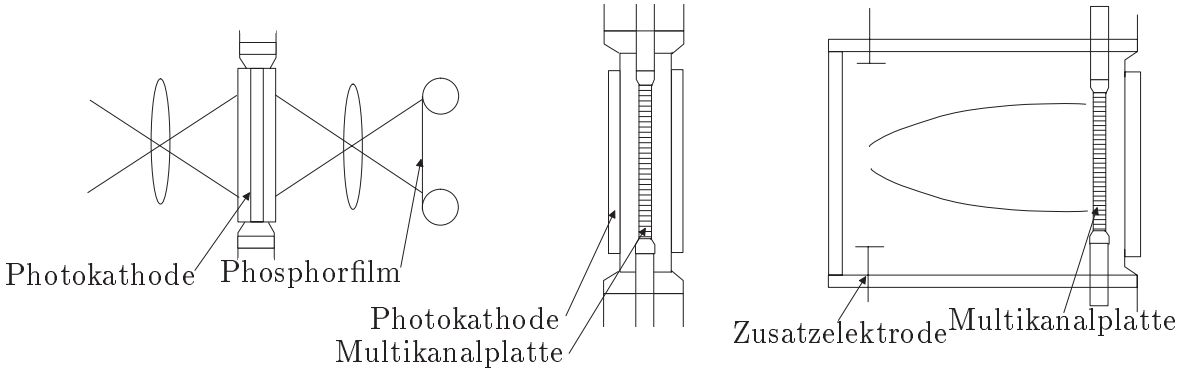

Abbildung 2.3: Prinzipieller Aufbau der nah-fokussierten Diodenröhre und zwei Elektronröhren mit Multikanalplatten („intensifier tubes“).

Kameras für die Aufnahme von Bildsequenzen (Framing-Kameras) müssen im wesentlichen und im Unterschied zu den vorher erwähnten Kameras für die Aufnahme von Einzelbildern zusätzliche Elektroden haben, um ein periodisches Abtasten der aufzunehmenden Szene und damit eine synchronisierte Shutterfunktion für jedes neue Bild zu gewährleisten. Sie benötigen ebenso eine zusätzliche Beschaltung für die Signalverstärkung, um eine höhere Empfindlichkeit zu erreichen [6]. Abhängig von der Kamerarealisierung können Bildraten von über 10^7 Bilder/s erreicht werden, sowie eine zeitliche Auflösung von weniger als 10 ns realisiert werden. Abbildung 2.3 zeigt den prinzipiellen Aufbau von Kameras mit nahfokussierter Diode und elektrooptischen Röhren mit eingebauten Multikanalplatten.

Eine weitere Gruppe der elektrooptischen Systeme stellen die Streak-Kameras dar, die eindimensionale Änderungen von zeitlich schnell ablaufenden Prozessen aufnehmen können. Hierfür wird die Szene über eine geeignete, mit Schlitzen ausgestattete Optik auf dieBildröhre mit zusätzlichem Ablenksystem projiziert. Streak-Kameras sind meistens im sog. Synchronmodus [7] oder im Pikosekunden-Zeitauflösungsmodus [8–10] realisiert. Die Kameras der ersten Gruppe werden in der Ballistik eingesetzt, wobei das Grundprinzip darin besteht,

eine Synchronisation zwischen der Geschwindigkeit des sich schnell bewegenden Objektes und der Geschwindigkeit, mit der der erzeugte Elektronenstrahl mit Hilfe der Ablenkelektroden auf den Film gesteuert wird, herzustellen. Die zweite Gruppe der Streak-Kameras wird für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt, wie beispielsweise für Aufnahmen von chemischen Reaktionen oder von biologischen Prozessen. Um sehr kurze Shutterzeiten zu erreichen, verwenden diese Kameras Röhren mit eingebauten Signalverstärkern („intensifier tubes“), die meistens als Mikrokanalplatten realisiert sind. Außerdem benötigen die Röhren zusätzliche Elektroden mit sehr starkem elektrischen Feld, um den Elektronenstrahl zu fokussieren, da eine Streuung der Elektronen zur erheblichen Verfälschung der in sehr kurzer Zeit ermittelten Information führen kann. Für einen zuverlässigen Betrieb ist eine sehr komplexe Elektronik notwendig, um die Röhre anzusteuern.

Eine letzte in der Hochgeschwindigkeitskinematographie stark etablierte Gruppe stellen die Röntgen-Kameras dar. Neben den Kameras, deren Empfindlichkeit im sichtbaren oder im infraroten Bereich liegt, sind für bestimmte Anwendungen, wie beispielsweise für die Entwicklung von Hochleistungslasern sowie für medizinische Untersuchungen, Kameras mit einer Empfindlichkeit im Röntgen-Bereich realisiert worden [11, 12], die sich ebenfalls durch hohe Bildwiederholraten auszeichnen.

Elektro-optische Hochgeschwindigkeitskamerasysteme finden heutzutage eine breite Anwendung in Bereichen wie Kernphysik, Lasertechnik, Ballistik, Werkstoffprüfung, usw. Diese komplizierten und kostenintensiven Systeme leiden unter Problemen wie beispielsweise einer sehr hohen Leistungsaufnahme, bedingt durch hohe Steuerspannungen ($2 - 15$ kV) der eingesetzten Röhren. Ferner verlangt die hoch entwickelte Röhrentechnik nach vielen speziellen Lösungen, um einen zuverlässigen Betrieb, hohe Bildqualität, kurze Shutterzeiten und hohe Empfindlichkeit zu gewährleisten.

Um die durch die Unvollkommenheit der Linsensysteme und die Röhren-Übertragungscharakteristik bedingten Aberrationen zu unterdrücken, müssen elektrostatische bzw. magnetisch fokussierte Röhren abgestimmt werden [3]. Ein weiteres Problem, das bei der Realisierung von kurzen Shutterzeiten entstehen kann, ist eine Beeinträchtigung der Szenenfokussierung aufgrund von starken Pulsen zur Ansteuerung der Röhren. Gleichzeitig führt eine für die variable Vergrößerung der Empfindlichkeit einstellbare Röhren-Verstärkung zum gleichen Effekt. Um für eine hohe Empfindlichkeit bei geringer Beeinflussung der Bildqualität zu bürgen, werden die Signale nicht durch Elektronenbeschleunigung bzw. das Anlegen von größen Steuerspannungen verstärkt, sondern es werden die elektrischen Signale mittels Multikanalplatten weiterverarbeitet [13]. Die Multikannalplatten verstärken die örtlich abgetasteten und durch kurze Belichtungszeiten schwachen Signale, so daß es zu einer Elektronenmultiplikation kommt. Ein Einsatz der Multikanalplatten erlaubt sogar eine intelligente Lösung zur Realisierung von kurzen Shutterzeiten, indem sie direkt mit Pulsen angesteuert werden. (In der Regel können sie auch an die anderen Kamerasysteme gekoppelt werden.)

Eine andere elektro-optische Möglichkeit kurze Shutterzeiten zu realisieren, bietet der Einsatz einer Kerr-Zelle. Sie bewirkt eine Doppelbrechung des Lichtes, die durch eine Änderung der Eigenschaften einer Flüssigkeit entsteht, wenn zwischen zwei Elektroden eine sehr hohe Spannung angelegt wird. Mit diesem Shutter ist es möglich, Belichtungszeiten von bis zu 30 ps zu realisieren. Der Nachteil besteht in einem geringen Transmissionsgrad sowie im Falle einer Framing- oder Streak-Kamera in einer kleinen Anzahl an aufzunehmenden Bildern.

2.3 Systeme mit kurzer Szenenausleuchtung

Die Grundidee dieser Aufnahmetechnik liegt in der Erzeugung von starken und kurzen Lichtpulsen, um eine aufzunehmende Szene zeitlich abzutasten, während der Shutter der Kamera geöffnet bleibt (oder nicht vorhanden ist). Dies stellt einen Gegensatz zu den meisten Anwendungen in der Bildakquisition bei hohen Bildraten und kurzen Belichtungszeiten dar, bei denen durch das Öffnen und das Schließen des Shutters eine zeitliche Abtastung der Szene realisiert wird.

Die ersten Systeme mit kurzer Ausleuchtung haben Blitzgeräte mit kurzer Beleuchtungsdauer verwendet, denen das schnelle Entladen eines Kondensators zugrunde liegt. Die nächste Gruppe stellen die Blitzröhren dar, die extern getriggert werden, so daß eine Ionisation ausgelöst wird und die Röhre blitzt. Solche Blitzröhren verwenden Xenon zur Ionisation bei einem Druck, der deutlich kleiner als der atmosphärische ist. Mit dieser Technik können Belichtungszeiten von ca. 1 μs erzielt werden. Eine Realisierung der Blitzröhrentechnik ist in [14] präsentiert. Bei beiden erwähnten Systemlösungen wird für eine Aufnahme von Bildsequenzen (Framing-Kamera) ein stroboskopischer Betrieb der Lichtquellen vorausgesetzt.

Ein weiterer Vertreter dieser Kameraklasse verwendet holographische Methoden zur Aufnahme von schnellen, aber kleinen Bewegungen. Diese Systeme sind prinzipiell sehr komplex, mit aufwendigen Linsensystemen ausgestattet und erfordern eine Laserbeleuchtung. Beispiele für Anwendugnen dieser Technik sind ein System für die Untersuchung der Deformationen von Oberflächen keramischer Platten [15] oder ein System für die Analyse der Vibrationen in der Automobiltechnik [16].

Wie später gezeigt wird, ist eine Kopplung der Szenenausleuchtung mit den Kamerasystemen auf der Basis von integrierten Bauelementen von sehr großer Bedeutung für Verfahren der optischen Meßtechnik. In dieser Arbeit werden auch modulare Systeme präsentiert, die den Einsatz von moduliertem Laserlicht kombiniert mit den entwickelten Hochgeschwindigkeitskameras verwenden, die für Anwendungen in der optischen Meßtechnik relevant sind.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel sind klassische Kamerasysteme für die Hochgeschwindigkeitsanwendungen kurz präsentiert worden. Opto-mechanische Systeme sind basierend auf klassischen Filmkameras entwickelt worden und beinhalten eine hohe Anzahl an komplizierten mechanischen Komponenten. Die Möglichkeiten der verschiedenen vorgestellten Kameras sind überwiegend durch Materialeigenschaften der eingesetzten Komponenten (beispielsweise Zerreißfestigkeit des Filmes, Festigkeit des rotierenden Spiegels usw.) oder des gesamten Systems (beispielsweise Systemvibrationen, Aberrationen durch die eingesetzten Spiegel usw.) bestimmt. Die physikalischen Grenzen der opto-mechanischen Systeme sowie ihre Komplexität und der Preis haben dazu geführt, daß zum einen an ihrer Entwicklung in letzter Zeit kaum gearbeitet wurde, und daß heutzutage opto-mechanische Systme sehr selten in der Hochgeschwindigkeitskinematographie eingesetzt werden.

Die elektro-optischen Systeme, basierend auf der Röhrentechnik als die nachfolgende Generation der Hochgeschwindigkeitskamera, haben einen großen Fortschritt verglichen mit optomechanischen Systemen erzielt. Mit ihnen war es möglich, aufgrund der besseren Zeitauflösung und höherer Bildraten nicht nur die Aufgaben der Standard-Hochgeschwindigkeitskinematographie besser zu lösen, sondern auch neue Anwendungsgebiete zu erreichen, die die Nano- und Pikosekundenbereiche der Zeitauflösung und mehrere Tausend Bilder/s Bildrate (sog. Ultra-Hochgeschwindigkeitskinematographie) benötigen. Dennoch stellen diese Kamerasysteme sehr komplexe Lösungen dar und benötigen hohe Steuerspannungen, komplizierte Ansteuerung und aufwendige Shutterrealisierungen. Das breite Spektrum der Anwendungsgebiete ist heute aufgrund der hohen Komplexität und der hohen Preise auf die Anwendungen reduziert, in denen bisher mit integrierten Bildsensoren keine guten Ergebnisse erreicht wurden.

Als letzte bemerkenswerte Gruppe der Hochgeschwindigkeitssysteme sind Kameras mit kurzer Szenenausleuchtung erwähnt worden. Basierend auf der Verwendung spezieller, teurer Blitzgeräte hat diese Technik für breitere Anwendungen weniger bedeutsame Einsätze gefunden.