

# VVENC UND VVDEC: FRAUNHOFER HHI STELLT OFFENE, OPTIMIERTE IMPLEMENTIERUNGEN DES NEUEN VIDEOKODIER- STANDARDS H.266/VVC BEREIT

ADAM WIECKOWSKI, BENJAMIN BROSS, DR. DETLEV MARPE

## Einleitung

Komprimierte Videodaten machen heute den mit Abstand größten Anteil an Bits im Internet sowie im mobilen Datenverkehr aus. Dabei ist die Tendenz weiter steigend. Im Juli 2020 wurde der neue Videokodierstandard Versatile Video Coding (H.266/VVC) verabschiedet. H.266/VVC wurde gemeinsam von ITU-T und ISO/IEC entwickelt und soll helfen, alle zukünftigen Herausforderungen im Bereich der Videoübertragung zu meistern.

**P**arallel zur Entwicklung der VVC-Standardspezifikation in Textform wurde eine Referenzimplementierung in Software gepflegt, das sogenannte VVC Test Model (VTM). Das VTM wurde während der Standardisierungsphase genutzt, um neu vorgeschlagene Technologien im Hinblick auf Kodiereffizienz und Komplexität zu erproben. Die Entwicklung der Kodiereffizienz (Bitratenreduktion) sowie der Enkoder-/Dekoderkomplexität (Laufzeit) für die verschiedenen Versionen von VTM gegenüber der HEVC-Referenzsoftware (HM) ist in Abbildung 1 dargestellt.

Es ist zu sehen, dass neben der Kodiereffizienz (grüne Kurve) auch die Enkoder-/Dekoderkomplexität (graue bzw. schwarze Kurve) gestiegen ist. Hierbei ist zu bemerken, dass der Anstieg für den Dekoder deutlich moderater ausfällt, wobei diese Asymmetrie für alle Anwendungen im Broadcast- oder Streamingbereich durchaus beabsichtigt ist. Getreu dem Paradigma „einmal Enkodieren und mehrfach Dekodieren“ (engl. encode once, decode many times), verfügen Endgeräte wie Smartphones oder Fernsehgeräte typischerweise nur über einen Dekoder. Dahingegen kommen Enkoder oftmals nur in leistungsstärkeren Rechnern, zum Beispiel in Sendezentren oder in der Cloud, zum Einsatz.

Nur zwei Monate nach der Fertigstellung des neuen Standards hat das Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut im September 2020 seine optimierten Implementierungen eines VVC-Enkoders (VVenc) und eines VVC-Dekoders (VVdec) veröffentlicht. Diese sind seitdem auf der Plattform GitHub als Quelltext frei verfügbar. Sie bringen neben erheblichen Beschleunigungen gegenüber der VTM-Referenzsoftware enkoderseitig zusätzlich noch Optimierungsoptionen im Hinblick auf die subjektiv wahrgenommene Bildqualität. Die höhere subjektive Qualität bei gleicher Bitrate von VVenc

gegenüber VTM wurde erst kürzlich in formalen VVC Verification Tests offiziell bestätigt.

## Versatile Video Coding

Bei der Entwicklung des neuen VVC-Standards standen zwei wesentliche Ziele im Vordergrund. Als erstes sollte VVC eine deutliche Steigerung der Kodiereffizienz gegenüber HEVC ermöglichen. Die erst kürzlich veröffentlichten Ergebnisse der formalen subjektiven Verification Tests bestätigen eine Bitrateneinsparung zwischen 40 und 50 Prozent bei gleicher subjektiver Qualität.

Das zweite Ziel steckt bereits im Namen des neuen Standards und heißt Vielseitigkeit (Englisch: Versatility/versatile). So sollte bereits die erste Version des Standards ein breites Spektrum an Anwendungen effizienter als je zuvor unterstützen. Dazu gehören die Kodierung von Computer-generiertem Video (zum Beispiel im Bereich Gaming, Bildschirm Inhalte für Videokonferenzen oder Remote-Desktop-Anwendungen), immersive Anwendungen wie 360-Grad-Video sowie Verbesserungen für adaptives Streaming mit wechselnden Bildauflösungen.

Beide Ziele werden durch den Einsatz neuer Algorithmen erreicht, wobei VVC genauso wie seine Vorgänger H.265/HEVC und H.264/AVC auf einem hybriden, blockbasierten Kodieransatz beruht. Dabei wird jedes Videobild in kleinere Blöcke aufgeteilt, die jeweils entweder mittels Intra- (im Bild) oder Inter-Bild-Prädiktion (mithilfe von Bewegungskompensation) prädiziert werden. Der daraus resultierende Prädiktions- oder Restfehler wird mithilfe von Transformation und Quantisierung statistisch dekorreliert und zusammen mit allen weiteren Daten zur Partitionierung und Prädiktion mithilfe von Entropiekodierung in einen standard-konformen Bitstrom geschrieben. Während im Großen und Ganzen keiner der Bausteine wie Prädiktion und Transformation neu ist, wurden diese jedoch methodisch erweitert und verbessert. Im Folgenden sind lediglich die neuen VVC-Algorithmen kurz aufgeführt. Diese sind durch ihre Komplexität für die im Weiteren diskutierten VVC-Implementierungen relevant.

- Bi-Directional Optical Flow (BDOF): Ermöglicht eine de-koderseitige Verfeinerung der Bewegungskompensation basierend auf dem Modell des optischen Flusses.
- Decoder-side Motion Vector Refinement (DMVR): Erlaubt ebenfalls eine de-koderseitige Bewegungsverfeinerung, allerdings durch zusätzliche Suche mittels Block Matching.
- Affine motion model: Ermöglicht die Erweiterung der

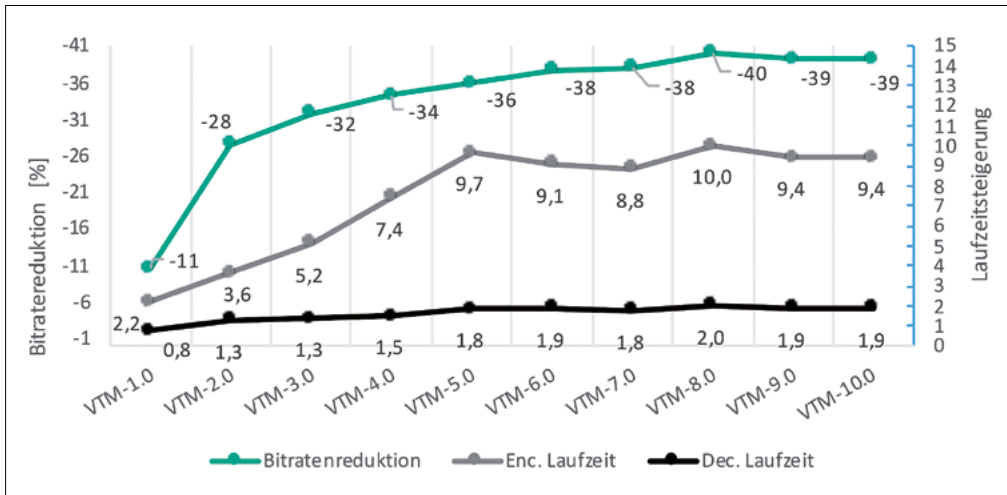


Abbildung 1: Progression der Kodier-effizienz sowie Encoder- und Dekoderkomplexität des VVC-Testmodells (VTM) während der Standardentwicklung gegenüber des HEVC-Testmodells (HM).

translatorischen Bewegungskompensation auf affine Bewegung wie Rotation, Scherung und Parallelstreckung.

- Luma Mapping with Chroma Scaling (LMCS): Ermöglicht eine adaptive Anpassung des Dynamikbereichs.
- Adaptive Loop Filter (ALF): Zusätzlicher, adaptiver In-Loop-Filter zur Verbesserung des Rekonstruktionssignals.
- Deblocking Filter (DBF): Der von HEVC und anderen Standards bekannte Deblocking Filter wird in VVC mit feinerer Granularität (4x4 Block-Raster) angewandt.
- Adaptive Motion Vector Resolution (AMVR): Ermöglicht die Signalisierung der Bewegungsvektoren mit einer adaptiven Auflösung mit Genauigkeiten von 1/4 eines Bildpunktes bis 4 Bildpunkte.
- Symmetric Motion Vector Difference (SMVD): Erlaubt es, bei Bi-Prädiktion aus zwei Richtungen nur einen Bewegungsvektor explizit zu übertragen. Unter der Annahme symmetrischer Bewegung wird dieser dann verwendet um den Vektor der anderen Richtung herzuleiten.
- Merge plus Motion Vector Difference (MMVD) und Geometric Partitioning Mode (GPM) sind weitere Algorithmen, die es ermöglichen, den von HEVC bekannten Merge-Modus zur effizienten Kodierung von Bewegungsinformationen adaptiv weiter zu verfeinern.

### VVdeC Software Dekoder

Das Fraunhofer HHI hat die Arbeiten an einem optimierten Softwaredekoder schon früh während der Standardentwicklung aufgenommen (siehe. FKT 8–9 2019, S. 60–63). Die ak-

tuelle Version ist nun mit dem finalen VVC-Standard konform und erlaubt eine sehr gut skalierende Parallelisierung. Diese enthält zudem strukturelle sowie algorithmische Optimierungen, die im Folgenden anhand diverser empirisch ermittelter Daten näher erklärt werden sollen.

In Abbildung 2 sind die Dekoder-Laufzeiten für fünf Sekunden lange Ultra High-Definition (UHD) Videosequenzen dargestellt, die jeweils in der Referenzimplementierung VTM-10 sowie in der optimierten Implementierung VVdeC von jeweiligen Komponenten in Anspruch genommen werden. Vor allem durch eine entschlackte Softwarestruktur und eine Optimierung der Sample-Operationen konnten viele Teile des Dekoders beschleunigt werden. Letztere konnten vor allem durch den umfangreichen Einsatz von Vektorisierung mit Single-Instruction Multiple-Data (SIMD) erreicht werden (z.B. Advanced Vector Extensions – AVX2). Im Gegensatz zu früheren Referenzimplementierungen wie HM für HEVC oder JM für AVC, enthält VTM eine ganze Reihe laufzeitoptimierter Algorithmen. Das betrifft vor allem die Interpolationsfilter und ALF. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, konnten diese in VTM bereits optimierten Routinen in VVdeC noch einmal um das Zweifache beschleunigt werden.

Der VVdeC-Dekoder kann das Dekodieren sehr effizient über mehrere Rechenkerne eines modernen Prozessors verteilen. So können je nach Rechenleistung, Anzahl der Kerne sowie Bitrate des Videos UHD-Videosignale mit bis zu 60 Bildern pro Sekunde (frames per second – fps) dekodiert werden. Im Abbildung 3 sind die erreichten Dekodiergeschwindigkeiten für UHD-Videos auf einer modernen Workstation

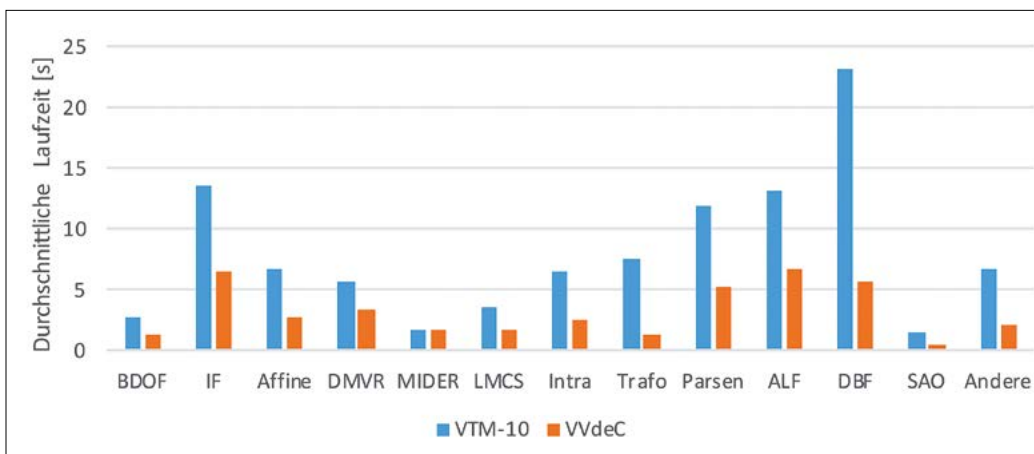


Abbildung 2: Durchschnittliche Verarbeitungsdauer einzelner Dekoderkomponenten für 5s lange UHD Sequenzen auf einem modernen Rechner mit AVX2-Unterstützung (IF = Interpolationsfilter, MIDER= Herleitung der Bewegungsinformationen, SAO = Sample Adaptive Offset Filter).

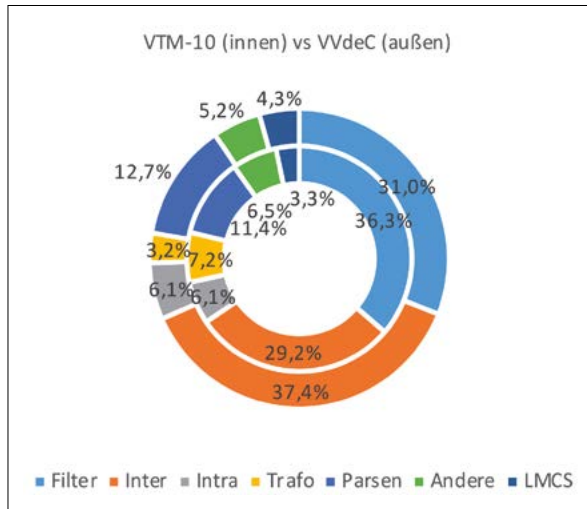


Abbildung 3: Dekodiergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der genutzten Rechenkern (Threads) sowie der Videobitrate auf einer modernen Workstation.

mit Core-i9-9980XE Prozessor für verschiedenen Bitraten und Anzahl von parallel genutzten Rechenkernen (Threads) abgebildet.

Die dargestellten Zahlen zeigen zum einen, dass der Dekoder ziemlich gut über die Anzahl der Kerne skaliert. Zum anderen wird auch bei höheren Bitraten deutlich, dass die Optimierung noch nicht abgeschlossen ist. Hier muss VVdeC, speziell was die Softwarestruktur und die Speicherzugriffe betrifft, noch weiter verbessert werden, um auch flüssiges Abspielen von UHD-Videos auf weniger leistungsstarken Rechnern zu ermöglichen.

### VVenC Software Encoder

Neben den Arbeiten am optimierten Dekoder VVdeC haben die Forscher des Fraunhofer HHI zusätzlich eine optimierte Encoder-Implementierung namens VVenC entwickelt. Im Gegensatz zum Dekoder, der das Video aus komprimierten VVC-Bitströmen streng nach Standard parst und dekodiert, hat eine Encoderimplementierung viel mehr Freiheiten. Grundsätzlich bietet jeder Videokompressionsstandard viele Möglichkeiten, ein Video zu kodieren. Das fängt an mit der Wahl der Partitionierung und setzt sich fort über die Anzahl der Prädiktions- und Transformationsmodi bis hin zu den umfangreichen Parametern der Filter.

Idealerweise würde ein Encoder alle Möglichkeiten ausprobieren und jene Kombination wählen, die bei gegebener Rate die beste Qualität liefert. Dieser Brute-Force-Ansatz ist aber nicht praktikabel, weshalb üblicherweise verschiedene Heuristiken verwendet werden, die den Parameterraum deutlich einschränken, ohne viel an Effizienz einzubüßen. Die vielen Freiheitsgrade erlauben es auch, einen Encoder anwendungsspezifisch zu optimieren. Für Video-on-Demand-Anwendungen kann ein Encoder viele Möglichkeiten testen und somit auf Kosten der Laufzeit die Kodiereffizienz steigern. Bei Videokonferenzen oder Live-Streaming/-Broadcasting hingegen muss ein Encoder den Suchraum aufgrund von Realzeitanforderungen und Latenz auf Kosten der Effizienz einschränken.

Im Allgemeinen, aber auch bei VVC im Speziellen, kann man – vereinfacht gesagt – zwischen zwei Arten von Kodieralgorithmen unterscheiden. Die einen, beispielsweise die dekoderseitige Verfeinerung der Bewegungsvektoren mit BDOF oder DMVR, werden implizit angewandt und können pro Bild oder pro Videosequenz eingeschaltet werden. Die anderen haben einen deutlich größeren Parameter- bzw. Suchraum. Das beinhaltet die Blockaufteilung, die für jedes Bild ermittelt und signalisiert werden muss, oder die Intra-Prädiktionsmodi und Parameter zur Bewegungskompensation, die für jeden einzelnen Block explizit signalisiert werden. In letzterem Fall muss der Encoder pro Block entscheiden, ob der spezifische Algorithmus angewandt werden soll, was zu Komplexitätssteigerungen führt. Deswegen ist die enkoderseitige Komplexität von VVC weniger von der Komplexität der einzelnen Algorithmen bestimmt (wie im Falle des Dekoders), sondern vielmehr von der Anzahl an möglichen Encoderentscheidungen, also dem zugrunde gelegten Suchraum. Bei VVC ist dieser Suchraum sehr hochdimensional, was zur Folge hat, dass die potenziell hohe Bitratenreduktion mit einer ebenfalls deutlich erhöhten Encoderkomplexität einhergeht. Dies ist in der anfangs diskutierten Abbildung 1 gut zu erkennen.

Für die Entwicklung des Encoders haben die HHI-Forscher mit einem sehr einfachen Grundgerüst angefangen. Dieses wurde nach und nach um weitere in VVC verfügbare Algorithmen ergänzt, wobei zuerst diejenigen integriert wurden, die eine hohe Kodiereffizienz bei vergleichsweise geringer Laufzeit aufwiesen. Darüber hinaus wurden die VTM-Suchalgorithmen in VVenC dahingehend optimiert oder durch neue oder angepasste Algorithmen ersetzt, die ein noch besseres Verhältnis zwischen Laufzeit- und Effizienzsteigerung erreichen.

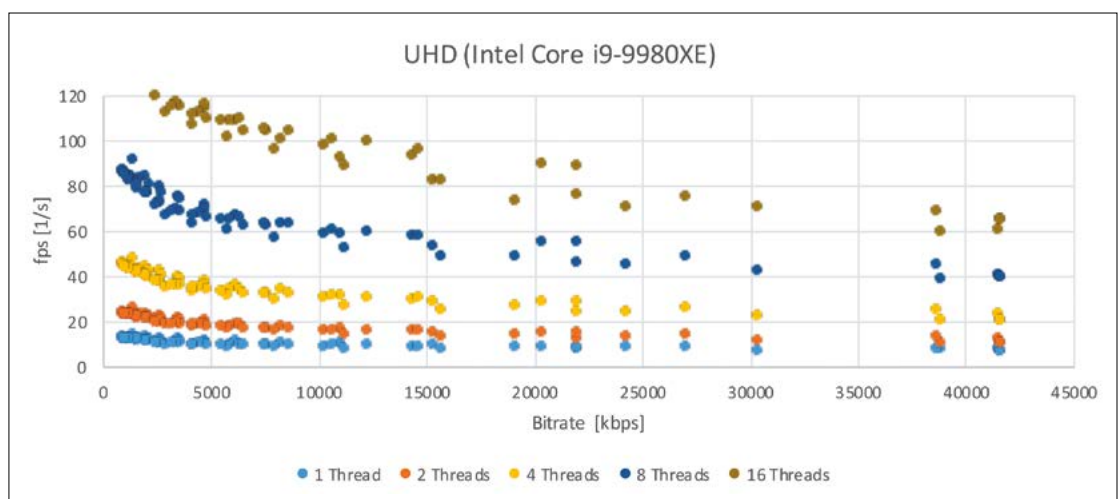


Abbildung 4: Durchschnittliche Zeit pro Bild in der Encodersuche. VTM-10 wurde in einer Konfiguration benutzt, die die gleiche Menge an Kodierwerkzeugen wie VVenC unterstützt. Für VVenC-VTM-comp wurde VVenC mit gleichem Suchalgorithmus gesteuert (MVD – Bewegungsvektordifferenzsuche).

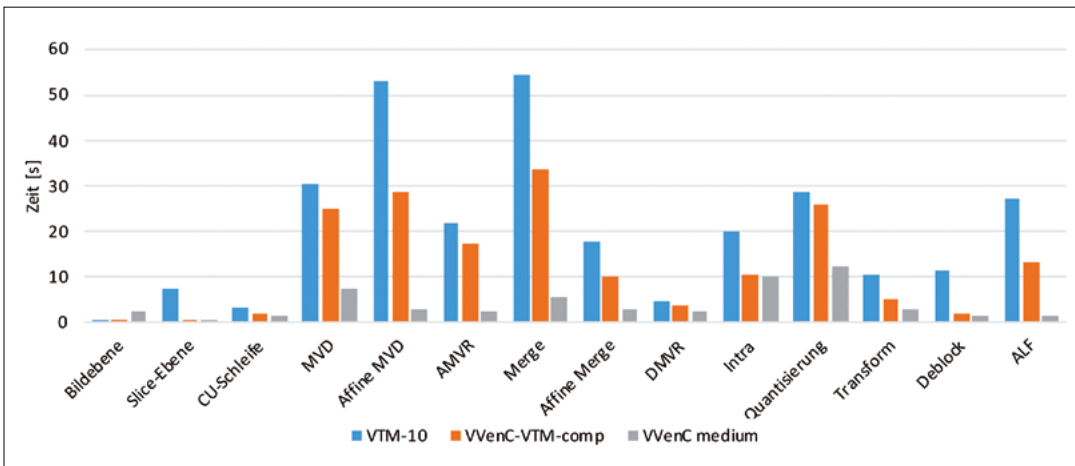


Abbildung 5: Verhältnis von Laufzeit- und Bitratendifferenz für VVenC bei unterschiedlichen Presets mit und ohne Parallelisierung im Vergleich zum HM-16.22 HEVC-Referenzencoder. Zusätzlich sind die Ergebnisse des VTM-10 VVC-Referenzencoders sowie des libAOM AV1-Encoders bei unterschiedlichen Presets abgebildet. Die Bitratendifferenzen basieren auf Messungen von Bitrate vs. PSNR.

Abbildung 4 zeigt die Laufzeiten für verschiedene VVC-Enkodieraspekte in der VTM-Referenzsoftware (VTM-10.0) in VVenC mit den gleichen Suchalgorithmen wie in VTM (VVenC-VTM-comp) sowie in VVenC mit optimierten Suchalgorithmen (VVenC medium). Hier ist zu bemerken, dass die ersten beiden Konfigurationen aufgrund der gleichen Enkodierentscheidungen die gleiche Kodiereffizienz aufweisen. VVenC in der „medium“-Konfiguration hingegen ist deutlich schneller, weist aber, wie im nächsten Abschnitt beschrieben, eine etwas geringere Kodiereffizienz auf. Es ist sehr deutlich zu erkennen, wo VVenC gegenüber VTM-10 Laufzeit einsparen kann. Der Unterschied zwischen VTM und VVenC-VTM-comp zeigt lediglich die verbesserte Implementierung des jeweiligen Algorithmus in VVenC, wobei viele Optimierungen aus dem Dekoder übernommen wurden. Der Vergleich von VVenC-VTM-comp zu VVenC medium zeigt, wieviel Laufzeit eingespart werden kann, wenn bei gleicher Implementierung zusätzlich noch der Suchalgorithmus angepasst wird. Die angepassten Suchalgorithmen betreffen vor allem die Bewegungskompensation und Blockaufteilung (wobei letzteres in der Abbildung nicht direkt erkennbar ist, weil sich dieses auf alle Suchbereiche auswirkt).

Gerade durch die Vielzahl neuer Möglichkeiten der Darstellung von Bewegungsvektordifferenzen (MVD inklusive SMVD, Affine MVD, AMVR) sowie Merge-Modi (Merge inklusive MMVD und GPM, Affine Merge) ist der Suchraum in diesem Bereich sehr groß. Durch neue Algorithmen können Entscheidungen in VVenC in diesem Bereich schon sehr früh getroffen werden, was die Laufzeit für VVenC medium effektiv reduziert. Weitere Bestandteile der Enkodierung, bei denen durch die optimierte Suche in VVenC medium die Laufzeit signifikant reduziert wurde, sind die Quantisierung sowie ALF.

Neben der erwähnten medium Konfiguration bietet VVenC drei weitere vorkonfigurierte Presets: slow, fast und faster. Jedes dieser Presets stellt einen anderen Operationspunkt bezüglich Laufzeit und Kodiereffizienz dar. So werden in den Presets „faster“ und „fast“ nur eine grundlegende, etwas eingeschränkte Blockaufteilung sowie Algorithmen, für die keine Entscheidungen getroffen werden müssen, angeschaltet. Beide Konfigurationen sind vor allem durch die Softwarestruktur und die Komplexität dieser Basisalgorithmen beschränkt. Das heißt, weitere Beschleunigungen sind nur noch durch eine verbesserte Struktur und Implementierungen der Algorithmen ohne Suche möglich. In der „medium“ Konfiguration werden eine Vielzahl weiterer Ko-

dierwerkzeuge von VVC benutzt, für die jedoch die oben diskutierten, angepassten Suchalgorithmen genutzt werden. In der langsamsten Konfiguration werden viele der schnellen Entscheidungsalgorithmen abgeschwächt sowie weitere Werkzeuge dazu genommen, um in etwa auf die Kodiereffizienz von VTM zu kommen. In Abbildung 5 sind die Laufzeiten sowie Kodiereffizienz durch Bitrateneinsparung bei gleichem Peak-Signal-to-Noise-Ratio (PSNR) der vier Presets von VVenC gegenüber der HEVC-Referenzsoftware HM dargestellt. Man sieht, dass die langsamste Konfiguration (slow) die gleichen hohen Rateneinsparungen wie VTM bei ungefähre der Laufzeit von HM erzielt.

Die zweitlangsamste Einstellung (medium) bietet dreifache Beschleunigung gegenüber HM, behält jedoch weiterhin noch einen Großteil der VTM-Gewinne. Darüber hinaus

Quelle: Fraunhofer HHI



**ADAM WIECKOWSKI**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer HHI. Er leitet die Entwicklungsarbeiten an den optimierten VVC-Software-Implementierungen VVenC und VVdeC.

➔ <https://www.hhi.fraunhofer.de/>

Quelle: Fraunhofer HHI



**BENJAMIN BROSS**

ist Leiter der Gruppe "Videokodiersysteme" am Fraunhofer HHI und Editor der HEVC- und VVC-Standards. Seine Veröffentlichungen zu H.265/HEVC wurden mehrfach ausgezeichnet.

➔ <https://www.hhi.fraunhofer.de/>

Quelle: Fraunhofer HHI



**DR.-ING. DETLEV MARPE**

ist Leiter der Abteilung „Videokodierung und Maschinelles Lernen“ am Fraunhofer HHI. 2015 wurde er zum IEEE Fellow ernannt.

➔ <https://www.hhi.fraunhofer.de/>



beinhaltet VVenC einige rein enkoderseitige Optimierungen, wie eine bewegungsoptimierte Vorfilterung, die weder in HM noch in VTM angeschaltet sind. In der Grafik sind zusätzlich fünf Arbeitspunkte des AV1-Enkoders (Version libaom v-2.0) unter weitgehend angepassten und somit vergleichbaren Kodierbedingungen dargestellt. Obwohl VVC erst im Juli 2020 fertiggestellt wurde und der AV1-Enkoder über zwei Jahre massiv optimiert wurde, ermöglicht die erste Version von VVenC bereits bei ähnlicher Laufzeit eine deutlich höhere Bitrateneinsparung.

Während sich der PSNR zur Entwicklung von Kodieralgorithmen durchaus als ein valides Maß objektiver Videoqualität etabliert hat, zählt am Ende doch die subjektiv wahrgenommene Bildqualität. VVenC enthält daher zur Steigerung der subjektiv wahrgenommenen Qualität die Option einer psychovisuellen Optimierung. Diese wird durch eine Adaption der Quantisierungsschrittweite auf Basis der lokalen zeitlichen und örtlichen Signalaktivität mithilfe des am Fraunhofer HHI entwickelten XPSNR-Modells ermöglicht. Durch die Nutzung dieser Optimierung hat VVenC im medium Preset bei formalen subjektiven Tests zur Verifizierung der Kodiereffizienz von VVC sogar besser als das VTM abgeschnitten und dies bei ungefähr 110-fach schnellerer Laufzeit.

Eine weitere Beschleunigung von Enkodern kann durch Parallelisierung erzielt werden. Für VVenC ist diese in der aktuellen Version sehr einfach gehalten, ermöglicht jedoch für UHD eine fast vierfache Beschleunigung bei sechs Threads oder eine dreifache Beschleunigung für UHD und HD bei vier Threads. Die erreichte Kodiergeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten CPU-Architektur und soll hier nicht weiter im Detail diskutiert werden.

### Zusammenfassung

Lediglich zwei Monate nach der Fertigstellung des VVC-Standards hat das Fraunhofer HHI im September 2020 optimierte Implementierungen von VVC-Enkoder- und -Dekodersoftware (VVenC und VVdeC) frei verfügbar auf GitHub veröffentlicht. Diese zeigen, dass VVC nicht nur auf dem Papier und für das PSNR-Qualitätsmaß ausgezeichnete Ergebnisse liefert, sondern auch großes Potenzial für praktische Anwendungen mit hoher subjektiver Qualität bei kleinen Bitraten aufweist. Während der Softwaredekoder noch etwas Arbeit braucht, um auch auf älteren Geräten Live-Dekodierung zu ermöglichen, kann der VVenC-Enkoder jetzt schon eingesetzt werden, um das große Potenzial von VVC in praktischen Anwendungen zu erproben. ➤

## NEUER MASTERSTUDIENGANG „DIGITALE TECHNOLOGIEN“ AN FH SÜDWESTFALEN

Die Fachhochschule Südwestfalen in Soest bietet zum Sommersemester 2021 den neuen Masterstudiengang "Digitale Technologien" an, der sich mit den Schwerpunkten Big Data, künstliche Intelligenz und IT-Sicherheit befasst. Die digitale Zukunft stelle sowohl Entwickler als auch Anwender vor neue Herausforderungen, heißt es in Soest. Die technische Realisierung der Digitalisierung über Hardware und Software muss entwickelt und permanent optimiert werden. Wirtschaftliche Prozesse ändern sich durch Digitalisierung maßgeblich und müssen demzufolge neu definiert und kompetent gesteuert werden. Nicht zuletzt ist auch die Rolle des Menschen in einer durch künstliche Intelligenz

gesteuerten Fabrik oder in der automatisierten Landwirtschaft zu überdenken. Mit seiner interdisziplinären Ausrichtung ist der Masterstudiengang "Digitale Technologien" für Studenten aus verschiedenen Fachrichtungen interessant. So werden Bachelor-Absolventen der Agrarwirtschaft, des Maschinenbaus, des Wirtschaftsingenieurwesens ebenso wie Absolventen interdisziplinärer Studiengänge mit technischer, design- oder managementorientierter Ausrichtung auf die Herausforderungen einer immer stärker digitalisierten Zukunft vorbereitet. Das Studium verknüpft fachspezifische Anwendungen mit Kompetenzen für die digitale Arbeitswelt und IT-Wissen. Absolventen werden aber nicht zu IT-Spezialisten ausgebildet, sie sind aufgrund ihres technischen Hintergrunds vielmehr in der Lage, Digitalisierungs-Technologien adäquat einzusetzen, die Ergebnisse anwendbar einzuordnen und die Möglichkeiten und Grenzen zu verstehen. Das mache den Studiengang "Digitale Technologien" an der Fachhochschule Südwestfalen einzigartig, teilt die Fachhochschule mit

Im Masterstudium werden Kenntnisse aus den Bereichen Big Data, IT-Netzwerke und IT-Sicherheit, maschinelles Lernen, Arbeitswelt 4.0 und digitale Geschäftsmodelle vermittelt. Individuell können bereits zu Beginn des Studiums Schwerpunkte gewählt werden, wie beispielsweise Additive Fertigung, Automatisierung, Simulation, Interaktionsdesign, E-Business/Online-Marketing oder Smart Farming. Die Regelstudienzeit beträgt drei bzw. vier Semester je nach Vorkenntnissen. Berufstätige können "Digitale Technologien" auch parallel zum Beruf studieren. In der Regel verlängert sich dadurch die Gesamtstudiendauer.

➤ [www.fh-swf.de/soest](http://www.fh-swf.de/soest)

