

Implementierung eines multithreaded TCP/IP Stacks für einen auf AMIDAR basierten Java Prozessor

Bachelorarbeit
Robert Wiesner
31. Mai 2017



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Erklärung gemäß § 22 Abs. 7 APB

Hiermit erkläre ich gemäß § 22 Abs. 7 der Allgemeinen Prüfungsbestimmungen (APB) der Technischen Universität Darmstadt in der Fassung der 4. Novelle vom 18. Juli 2012, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und alle genutzten Quellen angegeben habe und bestätige die Übereinstimmung von schriftlicher und elektronischer Fassung.

Darmstadt, den 31. Mai 2017

Ort, Datum

Robert Wiesner

Fachbereich Elektro- und Informationstechnik

Institut für Datentechnik

Fachgebiet Rechnersysteme

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Hochberger

Betreuer: Dipl.-Inform. Changgong Li

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Grundlagen Netzwerk und AMIDAR	5
2.1	Netzwerk Schichtenmodell	5
2.2	Ethernet	5
2.2.1	Verfahren	6
2.2.2	Ethernet Frame	6
2.3	Internet Protocol Version 4 (IPv4)	6
2.3.1	Paket Aufbau	6
2.3.2	Adressierung	8
2.3.3	Fragmentierung	8
2.4	Transmission Control Protocol (TCP)	9
2.4.1	Paketaufbau	9
2.4.2	Zustände	10
2.4.3	Sequenznummern	11
2.4.4	Verbindungsaufbau	11
2.4.5	Datenübertragung	11
2.4.6	Überlastkontrolle	12
2.4.7	Verbindungsabbau	13
2.5	Dynamic Host Control Protocol (DHCP)	14
2.5.1	Paket Format DHCP (Bootstrap)	14
2.5.2	Ablauf	16
2.6	AMIDAR Prozessor	16
3	Implementierung des TCP/IP Stacks	17
3.1	Überblick	17
3.2	IP Stack	18
3.2.1	IP Paket	18
3.2.2	Empfangen von IP Paketen	18
3.2.3	Senden von IP Paketen	19
3.2.4	Address Resolution Protokoll (ARP)	19
3.3	TCP	20
3.3.1	TCP Stack	20
3.3.2	TCP Verbindung	20
3.3.3	TCP-Paket	20
3.4	Zero Copy	24
3.5	DHCP	25
3.5.1	DHCP-Paket	25
3.5.2	DHCP-Controller	25
3.6	Packet Builder	25

4	Evaluation	27
4.1	Testaufbau	27
4.2	Grundlegende Funktionen	27
4.3	Performanz	27
5	Zusammenfassung und Ausblick	29

1 Einleitung

AMIDAR, steht für Adaptive Microinstruction Driven Architecture, dabei handelt es sich um ein Modell eines adaptiven Prozessors, das es diesem erlaubt zur Laufzeit einer Anwendung auf deren spezifische Anforderungen zu reagieren. Dazu gehört das Anpassen von Busstrukturen und bestehenden Funktionseinheiten. Dazu kommt die Synthese von neuen Funktionseinheiten. Im Fachgebiet Rechnersysteme der TU-Darmstadt wird momentan ein Prototyp in Form eines Java-Prozessors implementiert.

Dieser wird zur Zeit erweitert, mit dem Ziel die Performance deutlich zu erhöhen. Um diese zu evaluieren fehlen Beispielanwendungen. Eine wichtige Anwendung im Umfeld von eingebettet Systemen ist der TCP/IP Stack.

Zum Zeitpunkt der Arbeit verfügt AMIDAR mit der dazugehörigen API bereits über grundlegende Netzwerk Funktionalitäten. Dazu gehören die Unterstützung für die Protokolle Ethernet, ARP, begrenzt IPv4 und UDP. Mit UDP kann keine verlustfreie Datenübertragung garantiert werden, welche für viele Netzerkanwendungen vorausgesetzt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein TCP Stack entwickelt, sowie der IP Stack erweitert um eine geordnete und verlustfreie Datenübertragung zu realisieren. Die Funktionalität von diesem wurde mit einen auf einen FPGA synthetisierten AMIDAR System getestet.

2 Grundlagen Netzwerk und AMIDAR

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von AMIDAR und der für diese Arbeit genutzten Netzwerkprotokolle erläutert.

2.1 Netzwerk Schichtenmodell

Netzwerk Kommunikation zwischen Anwendungen wird üblicherweise als Schichtenmodell beschrieben. Die unterste Schicht stellt dabei das "Physical Layer" da. Das beschreibt die Physische Übertragung von Daten. Darüber sorgt die Sicherungsschicht für eine funktionierende Verbindung zwischen Endgeräten und dem Übertragungsmedium. Auf dieser Schicht wird zum Beispiel das Ethernet Protokoll eingesetzt, das Netzwerkteilnehmer über die MAC-Adresse im lokalen Netz adressiert, die übertragenen Daten auf Fehler überprüft und im Zweifel verwirft. Darüber kommt die Vermittlungsschicht, in der die Endgeräte über mehrere Subnetze hinweg Adressiert werden und Routing und Datenflusskontrolle gesteuert werden. Ein wichtiges Protokoll dieser Schicht ist das IP Protokoll.

Bei einer Datenübertragung von einer Anwendung zu einer auf einen anderen Endgerät laufenden, werden die Daten durch die Schichten nach unten gereicht, wobei in jeder Schicht ein neuer Header erzeugt wird, der für die jeweilige Schicht wichtige Informationen enthält. Zum Beispiel werden die Daten von der Anwendung mit betriebsystemsabhängigen Systemaufrufen an den TCPStack übergeben. Dieser erzeugt ein TCP Paket, das außer den Daten einen Header enthält, welcher Information bereitstellt, die unter anderen für das richtige Zusammensetzen der einzelnen Datenpakete beim Empfänger, als auch für die Zuordnung der übertragenen Daten zu der jeweiligen Anwendung benötigt werden.

Bei der anschließenden Erzeugung des IP Pakets bilden das TCP Paket, bestehend aus Nutzdaten und TCP-Header die zu übertragenden Daten. Der IP Header enthält unter anderen die IP-Adressen des Ziel und Quell Geräts. Das IP Paket bleibt im Normalfall unverändert, bis das Zielgerät erreicht ist. An der nächst unteren Ebene steht das Ethernet Datagramm. Es enthält neben dem IP Paket die Physischen Adressen des Quell Endgeräts und der nächsten Zwischenstation, auf dem Weg zum Ziel. Bei Zwischenstationen wird anhand der Informationen des IP Headers der nächste Wegpunkt ermittelt und ein neues Datagramm erzeugt.

Wenn ein Datagramm das Ziel erreicht, wird das IP Paket extrahiert und daraus das TCP Paket. Anhand der Port Nummer kann das TCP Paket der Anwendung zugeordnet werden.

2.2 Ethernet

Ethernet nach der IEEE Norm 802.3 ist seit den 90ern der am weitesten verbreitete Standard für Lokale Netzwerke und beschreibt sowohl die Bitübertragungs als auch die Sicherungsschicht.

2.2.1 Verfahren

Um zu ermöglichen das mehrere Endgeräte auf den selben Physischen Medium kommunizieren können wurde früher ein Zeitmultiplexverfahren eingesetzt, das durch den CSMA/CD Algorithmus gesteuert wird. Wenn eine Stelle Daten zum senden bereithält, wartet diese bis das Medium ungenutzt ist und fängt dann an die Daten zu übertragen. Wenn 2 Stellen gleichzeitig zu Senden beginnen, wechseln beide auf ein Störung-Erkant Signalmuster und beenden die Übertragung. Nach einer zufällig langen Pause wird jeweils ein erneuter Übertragungsversuch gestartet. Mittlerweile werden Kollisionen durch die Einführung von Switches verhindert. In diesen können Ethernet Pakete zwischengespeichert werden bis diese gesendet werden können. Dadurch wird eine Vollduplex Übertragung zwischen Switches und anderen Endgeräten ermöglicht. Es kann jedoch vorkommen, das Switches bei zu großen Datenaufkommen überlastet werden weswegen die Ethernet Flow Control Datenpakete verwerfen kann. Deswegen ist es wichtig, das Protokolle auf den darüber liegenden Schichten verworfene Datenpakete erkennen und wiederholt senden können um eine zuverlässige Datenübertragung zu gewährleisten.

2.2.2 Ethernet Frame

Ein Ethernet Paket beginnt mit einer sieben Bit langen Präambel die aus einer alternierenden Folge von Einsen und Nullen besteht. Diese wird für die Synchronisation der Verbindung benötigt und ermöglicht es die Folgen Daten von Hintergrundrauschen zu unterscheiden. Unterbrochen wird die Präambel durch das auf Eins gesetzte SStart of Frame"Bit was mit den letzten Bit der Präambel 2 aufeinander Folgende Einsen ergibt. Der eigentliche Ethernet Frame beginnt mit der aus Sechs Byte bestehenden Ziel MAC-Adresse gefolgt von der Quell MAC-Adresse. Dazu kommen 2 Byte die den Typ des darüber liegenden Protokolls angeben. Zum Beispiel 0x0800 gibt IPv4 an. Dahinter kommen 46-1500 Bytes an Daten, gefolgt von 4 Bytes Frame Check Sequence. Diese besteht aus einer CRC Checksumme.

2.3 Internet Protocol Version 4 (IPv4)

Das IP Protokoll ist das für die Datenübertragung wichtigste Protokoll, auf der Vermittlungsschicht. Es wurde Entwickelt um eine paketvermittelte Kommunikation über mehrere Computernetzwerke hinweg zu ermöglichen. Quellen und Ziele der Übertragungen werden jeweils als Adressen mit fester 32 Bit Länge angegeben. Es gibt keine Mechanismen für Zuverlässige Übertragung, Flusskontrolle und Sequenzierung, weswegen das darüber liegen Protokoll dies sicher stellen muss. Es gibt jedoch Möglichkeiten zur Paketfragmentierung, falls Datenpakete die Maximale Segment Größe für Pakete der darunter liegenden Schicht überschreiten sollten.

2.3.1 Paket Aufbau

Version: Gibt in an welche Version des IP Protokolls verwendet wird. (4Bit)

IHL: Steht für Internet Header Length und gibt an wie 32Bit Wörter von dem IP-Header be-

legt werden.

ToS: Type of Service beinhaltet abstrakte Parameter zur Bestimmung der Qualität des gewünschten Services. Dabei geben die Bits Null bis Zwei die Priorität der Daten an. Die Bits Drei, Vier und Fünf stehen für niedrige Latenz, hohen Durchsatz und hohe Zuverlässigkeit. Die letztgenannten Parameter werden von Netzwerkgeräten von unterschiedlich interpretiert, in dem meisten ruft bessere Performance für einen der Parameter eine Verschlechterung bei einen anderen herbei.

Paketlänge: Gesamtlänge eines Pakets in Bytes einschließlich des Headers. Die 16Bit ergeben eine theoretische Gesamtlänge von 65.535 Bytes, was für viele Netzwerke jedoch nicht geeignet ist. Als Mindestgröße die alle Hosts unterstützen müssen wurde 576 Bytes festgelegt. Das ermöglicht es 512 Byte Daten und 64 Byte Header in einen Paket zu übertragen. Da der IP Header selber nur 20 Byte benötigt bleibt noch ein Puffer von 44 Byte für den Header des darüber liegenden Protokolls.

Kennung: Ein Identifikationswert, der benötigt wird um fragmentierte Pakete wieder zusammen zu setzen. (16Bit)

Flags: 3 Bits von denen das erste reserviert ist und dauerhaft auf Null gesetzt wird. Das zweite Bit gibt an, ob das Paket fragmentiert werden darf. Das letzte Bit wird gesetzt, wenn nach dem Paket noch weiter Fragmente folgen.

Fragment-Offset: Besteht aus 13 Bit und gibt an, an welche Stelle des Datagramms die Daten dieses Fragments gehören.

TTL (Time-to-live): Gibt die maximale Zeit in Sekunden an, die ein Paket im Netzwerk unterwegs sein darf. Sobald die TTL den Wert Null erreicht muss das Paket gelöscht werden. Da der Wert bei jeder Zwischenstation, unabhängig von der eigentlichen Verarbeitungszeit ebenfalls um eins Reduziert werden muss ist die übliche Lebensdauer eines Pakets deutlich kürzer als in der TTL angegeben.

Protokoll: Gibt an welches Protokoll im nächst höheren Level verwendet wird.

Header Checksumme: Checksumme nur über den Header. Da sich der Header beim Weg Zwischenstationen verändern kann, zum Beispiel wegen der Time to Life , muss die Checksumme nach jeder Verarbeitung des Headers an den Zwischenstationen neu berechnet werden.

Quell-IP-Adresse: IP Adresse des Hosts, der das Paket ursprünglich versendet hat.(4 Byte)

Ziel-IP-Adresse:IP Adresse des Zielendgeräts. (4 Byte)

Optionen/Füllbits

2.3.2 Adressierung

Um mehrere Netzwerke innerhalb eines großen zu ermöglichen, werden IP Adressen interpretiert, in dem eine bestimmte Menge der höherwertigen Bits das Netzwerk spezifiziert und die restlichen Bits den genauen Hosts des gewählten Netzwerks adressieren. Dabei soll Flexibilität bei der Unterteilung von kleineren Teilnetzwerken ermöglicht werden. Daher wurde das Adressfeld entsprechend in bestimmte Klassen unterteilt. Es wurden 3 Klassen A,B,C angelegt. Die Klassen unterscheiden sich jeweils durch die Aufteilung des Adressbereichs zwischen Netzwerk Adresse und Host Adresse innerhalb des Netzwerks. Die ersten 1-3 Bits der Adresse geben jeweils Ausschluss darüber zu welcher Netzwerkkategorie die jeweilige IP-Adresse gehört. Um innerhalb dieser starren Netzwerke feiner Aufgeteilte Subnetze zu erzeugen kann die Subnetmask genutzt werden. Die Subnetmask ist ebenfalls eine 4 Byte Zahl, deren niederwertige Bits auf Null gesetzt werden und damit den Variablen Teil innerhalb des subnetz angeben. Der Rest der Maske wird dabei auf Eins gesetzt.

2.3.3 Fragmentierung

Paketfragmentierung wird nötig, wenn ein Paket aus einem Netzwerk kommt das eine große maximale Segmentgröße erlaubt und durch eines geleitet wird, das nur eine kleinere Segmentgröße erlaubt. Dabei können die Pakete in eine theoretisch nahezu endlose Anzahl von kleinen Paketen zerlegt werden. Dabei müssen die Datenblöcke alle Fragmente bis auf das letzte ein vielfaches von 64 Byte an Daten beinhalten. Damit fragmentierte Paket richtig zusammen gesetzt werden können, haben alle Fragmente, eines Pakets, die selbe Identifikationsnummer. Für das Zusammensetzen des Datenblock wird der Fragmentoffset benötigt der angibt, an welcher Stelle des ursprünglichen Datenblocks die Daten des Fragments stehen. Wobei das fragmented-flag angibt, ob noch weitere Fragmente folgen, oder ob dies das letzte Teil ist. Sobald alle Fragmente eines Pakets beim Ziel eingetroffen sind, kann das ursprüngliche Paket wiederhergestellt werden.

2.4 Transmission Control Protocol (TCP)

Da die Protokolle der unteren Schichten, IP und Ethernet keine fehlerfreie und Verlustlose Übertragung der Daten garantieren können, wird ein Protokoll auf der Transportschicht benötigt, das eine zuverlässige Übertragung von Daten zwischen Anwendungen auf entfernten Hosts sicherstellen kann, auch wenn auf jeden Hosts eine große Anzahl an Anwendungen läuft, die TCP verwenden. Für diesen Zweck wurde das TCP-Protokoll erschaffen. Um dabei die Datenpakete jeweils der richtigen Anwendung zuzuordnen zu können werden Port-nummern verwendet.

Es handelt sich bei TCP um ein verbindungsorientiertes Protokoll, das bedeutet, dass es zu Beginn einer Übertragung einen klar definierten Verbindungsaufbau gibt. Nachdem die Verbindung etabliert ist, können Daten voll duplex in beide Richtungen übertragen werden. Dabei wird durch Sequenznummern und Acknowledge Nummern die richtige Reihenfolge und Vollständigkeit der Datenpakete sichergestellt. Pakete, deren Erhalt nicht bestätigt wurde, werden automatisch neu übertragen. Des Weiteren verfügt TCP über Mechanismen, um eine Überlast auf dem Übertragungsweg rechtzeitig zu erkennen und zu beheben.

2.4.1 Paketaufbau

Quell Port (16Bit): Gibt die Portnummer der Anwendung auf Senderseite an

Ziel Port (16Bit): Gibt die Portnummer der Anwendung auf Empfängerseite an

Sequence Number (32Bit): Gibt die Sequenz Nummer des Pakets an.

Acknowledge Number (32Bit): Gibt die Acknowledge Nummer des Pakets an.

Data Offset (4Bit): Anzahl von 32Bit Wörtern, aus denen der Header besteht.

Reserved (6Bit): reserviert für zukünftige Nutzung

Steuerungsbits (6Bit): 6 Flags, die für die Ablaufsteuerung der Übertragung genutzt werden:

URG: Urgent Pointer, wird in moderner Software nicht mehr genutzt und wird von vielen Implementierungen ignoriert.

ACK: Acknowledgment gibt an, ob das Paket eine gültige Bestätigung für empfangene Pakete enthält.

PSH: Push, ist dieses Flag gesetzt, werden die empfangenen Daten sofort an die Hostsoftware weitergereicht.

RST: Resetzt die Verbindung. Wird im Fehlerfall gesendet und bricht die Verbindung ab.

FIN: Signalisiert das Ende der Verbindung, wenn es keine zu übertragenden Daten gibt.

Window (16Bits): Gibt die Größe des Empfangs-Fenster des Absenders an. Gilt für den Empfänger als obere Grenze des Congestion Windows

Checksum (16Bits): Für die Berechnung der Checksumme über das TCP Paket wird vorher ein Pseudoheader bestehend aus den Quell- und Ziel IP-Adresse, dem IP-Code für das verwendete Protokoll und der Gesamtlänge des eigentlichen TCP Pakets. Die Checksumme wird daraufhin über den Pseudoheader, den Header und die Payload berechnet. Dafür werden

diese in 16 Bit große Blöcke aufgeteilt und im einer Komplement die Summe über diese gebildet.

UrgentPointer (16Bits): Gibt den Urgentpointer als Offset zu der Sequenznummer an. Wird nur interpretiert, wenn das URG Flag gesetzt ist.

Options: (Variabel): Optionale Informationen, die von TCP Implementierungen unterstützt werden können um Sicherheit und Performance zu verbessern. Optionen bestehen entweder nur aus einen Optionsbyte oder haben zusätzlich ein weiteres Byte das die Länge der jeweiligen Optionen angibt.

Padding: Falls der TCP Header mit den Optionen einen teilweise genutzten 32Bit Block hat, wird dieser mit Nullen aufgefüllt.

2.4.2 Zustände

TCP ist im Gegensatz zu den bisher genannt Protokollen Zustandsorientiert, was bedeutet, das es ja nach Zustand anders auf Nutzeraktionen und ankommende Pakete reagiert. Zu den Zuständen gehören :

CLOSED : Das ist der Start zu stand einer TCP Instanz. Die Verbindung ist geschlossen. Usercalls außer "Öpen"werden mit Fehlermeldungen quittiert und ankommende Pakete werden verworfen und mit einen Reset-Paket beantwortet.

SYN-SENT: Nachdem eine Verbindung initiiert wurde, wird auf eine Antwort des "remote Hosts"gewartet.

SYN-RECEIVED : Nachdem ein SYN Pakte erhalten und ein SYN-ACK gesendet wurde wird auf das ACK gewartet, um den 3-Wege-Handschlag abzuschließen.

ESTABLISHED: Nach dem der Verbindungsaufbau erfolgreich abgeschlossen wurde befinden sich beide Hosts im ESTABLISHED Zustand, in dem die eine Vollduplex Kommunikation möglich ist.

FIN-WAIT-1: Wenn ein Verbindungsabbau initiiert wurde wird ein FIN Paket gesendet und in den Zustand FIN-WAIT-1 gewechselt und auf die Bestätigung des Erhalts gewartet.

FIN-WAIT-2: In dem Fall das die Gegenstelle noch Daten zu übertragen hat, bleibt die Verbindung einseitig offen um die letzten Pakete zu empfangen.

CLOSING: Wartet auf das letzte ACK-Paket und wechselt, wenn dieses ankommt in den Zustand TIME-WAIT.

TIME-WAIT: Hält die Verbindung nach Beendigung einige Minuten offen, um auf verzögerte Pakete zu reagieren.

Zu den Zuständen kommen noch eine Reihe von Ereignissen auf, auf die, abhängig von den jeweiligen Zuständen entsprechend reagiert werden muss. Dazu gehören neben eintreffenden Paketen und Timeouts die Usercalls.

Active OPEN: Öffnet einen Port und initiiert den Verbindungsaufbau zu einen Remote Host.

Passive OPEN: Öffnet einen Port ohne eine Verbindung zu initiieren und wartet auf einen Verbindungsaufbau,

SEND: Fügt dem Sendepuffer Daten hinzu und sendet gegebenenfalls ein Datenpaket.

RECEIVE: Überprüft, ob genug Daten vorhanden sind und gibt diese an die Anwendung zurück.

CLOSE: Initiiert den Abbau der Verbindung, wenn es keine Daten mehr zu übertragen gibt.

ABORT: Bricht die Verbindung ab. In den meisten Zuständen wird in dem Fall ein Reset Paket gesendet.

2.4.3 Sequenznummern

Ein wichtiges Grundprinzip von TCP das jedes Byte an Daten eine eigene Sequenznummer zugewiesen werden kann, dadurch ist es möglich, das jedes Byte einzeln bestätigt werden kann. Der in TCP dazu verwendete Mechanismus arbeitet kumulativ. Das bedeutet das wenn eine Sequenznummer bestätigt wird, alle Sequenznummern kleiner als die Bestätigungsnummer als angekommen gelten. Dadurch wird es einfach den Verlust einzelner Pakete zu erkennen und diese nochmal zu senden. Das erste Byte eines Datenpaketes entspricht dabei der Sequenznummer des Pakets.

2.4.4 Verbindungsaufbau

Um zuverlässig einen sicheren Verbindungsaufbau zu gewährleisten verwendet TCP einen Drei Wege Handshake. Soll eine neue Verbindung aufgebaut werden wird die Initiale Sequenznummer zuverlässig generiert. Das SYN Paket enthält nur den HEADER mit der um eins inkrementierten Initialen Sequenznummer und den SYN bit auf eins gesetzt. Nach dem Sendevorgang wird in den Zustand SYN-SENT gewechselt. Wenn die Empfängerseite sich im Zustand LISTEN befindet kann die Verbindungsanfrage bestätigt werden. Dafür wird ebenfalls eine Initiale Sequenznummer generiert. Zur Antwort wird ein Paket erzeugt, das die neue initiale Sequenznummer verwendet und als Acknummer die um eins erhöhte Sequenznummer des SYN Pakets verwendet. Die Flags für SYN und ACK werden gesetzt. Nach dem senden wird in den Zustand SYN-RECEIVED gewechselt.

Nach dem Erhalt des SYN-ACK Pakets sendet die initiiierende Seite ein leeres ACK Paket und wechselt in den ESTABLISHED Zustand.

2.4.5 Datenübertragung

Wenn beide Seiten einer Verbindung den Established-Zustand erreicht haben, kann die eigentliche beidseitige Datenübertragung beginnen. Dabei wird die Übertragung der Daten als kontinuierlicher Datenstrom abstrahiert. Eine Anwendung schreibt dabei Bytes auf die in einen Datenpuffer im TCP-Stack. Die Daten werden nicht sofort übertragen, da sonst viele Pakete mit wenig Nutzdaten gesendet werden würden und die Verbindung schnell überlastet wäre, wobei ein großer Teil der übertragenen Daten für den durch TCP-, IP- und Ethernet-Header

erzeugten Overhead genutzt werden müssten. Sobald der Schreibpuffer eine bestimmte Größe erreicht hat, oder die Software einen PUSH signalisiert, wird ein TCP-Paket erzeugt, das die Daten aus dem Puffer überträgt. Jedes Datenpaket wird mit einem Zeitstempel in der Retransmitqueue zwischengespeichert bis der Erhalt dieser bestätigt wurde. Nach dem Eintreffen eines Pakets, dessen ACK Flag gesetzt wurde, gelten alle Pakete, der Sequenznummer unter der Acknowledge-Nummer des angekommenen Paktes liegen bestätigt. Diese werden aus der Retransmitqueue entfernt. Wenn für ein Paket eine bestimmte Zeit lang keine Bestätigung eingetroffen ist, wird dieses nochmal gesendet.

2.4.6 Überlastkontrolle

Ein weiterer Schwerpunkt bei TCP ist das verhindern der Überlastung des Netzwerks, das zwischen Sender und Empfänger liegt, als auch die des Empfängers selber. Die beiden Mechanismen werden "Flow Control" und "Congestion Control" genannt. Flow Control verhindert dabei die Überlastung des Empfängers und Congestion Control die des Übertragungsweges.

Für das Senden von Daten wird für Flow und Congestion Control jeweils ein Fenster bestimmt. Das Fenster gibt an, wie viele Bytes gesendet werden können, ohne dass diese bestätigt wurden. Wenn die Differenz der Sequenznummern und der letzten erhaltenen Acknowledgenummer so groß ist wie das Fenster, werden keine neuen Datenpakete mehr versendet, bis weitere Pakete bestätigt wurden. Es wird jeweils das kleinere Fenster als Grenze genommen.

Das Flow Control vom Empfänger im TCP Header der von ihm versendeten Pakete angeboten. Das Problem bei der Congestion Control ist, dass die Kapazität der Verbindung nicht trivial zu bestimmen ist. Für eine Annäherung kommen im Normalfall vier Algorithmen zum Einsatz. Mit Hilfe der Variable "Slow Start Threshold" wird festgelegt, welcher der Algorithmen im aktuellen Zeitpunkt zum Einsatz kommt. So lange unter der Slow Start Threshold liegt, wird der Slow Start Algorithmus verwendet. Eine Überlastung der Verbindung kann festgestellt werden, wenn mehrere Acknowledge Pakete für die selbe Sequenznummer empfangen werden.

Zu Beginn einer Übertragung liegen noch keine Informationen über die mögliche Bandbreite des Netzwerks vor, weswegen die Bandbreite langsam sondiert werden muss. Dabei wird Slow Start Algorithmus genutzt, mit dem durch schnelles ansteigen der Übertragungsrate der Grenzwert erreicht wird. Die Slow Start Phase wird genutzt, bis die Größe des Congestion Windows die Slow Start Threshold übersteigt, oder eine Überlastung der Verbindung festgestellt wird. Da die Grenze der Verbindungskapazität sondiert werden soll, wird die Slow Start Threshold zu Beginn auf einen Wert gesetzt, der nicht erreicht werden kann. Wenn es zu einem Packet Timeout, wird die Slow Start Threshold auf einen Wert, der einen Bruchteil des erreichten Fensters entspricht gesetzt und der Slow Start Algorithmus, mit einem größeren Initialen Fenster, weiter verwendet. Diesmal wird die Slow Start Phase durch das Überschreiten der Slow Start Threshold beendet. Für den Rest der Übertragung wechseln sich die beiden Algorithmen ab, bis die Verbindung beendet ist.

Es gibt eine Reihe von Varianten für die Congestion Control Implementierung. Alle davon ver-

wenden eine Variation der folgenden Algorithmen. Hier wird als Beispiel die Reno Variante genannt.

Slow Start: Vergrößert das Congestion Window mit jedem bestätigten Segment um die Größe des Segments. Effektiv eine Verdoppelung des Windows pro Roundtrip. $N :=$ Anzahl der im letzten Ack bestätigten Sequenznummern

Congestion Avoidance : Arbeitet nach dem Prinzip Additiv Erhöhen, multiplikativ erniedrigen.

Fast Retransmit : Findet statt, wenn mehrere ACKNOWLEDGE-Pakete für das selbe Segment empfangen werden. Dabei kann sicher davon ausgegangen werden, dass dieses Segment verloren gegangen ist. In diesen Fall wird nicht auf einen Timeout für dieses Paket gewartet, stattdessen wird dieses sofort gesendet. In den meisten Algorithmen wird ein Fast Retransmit nach einem drei mal wiederholten Acknowledge durchgeführt. Die Slow Start Threshold wird nach einem Fast Retransmit auf den Wert des halbierten Congestion Windows gesetzt und das Congestion Window auf die neue Slow Start Threshold gesetzt und um drei erhöht. Dadurch wird die Slow Start Phase übersprungen, da durch die Ankunft der Acknowledge Pakete davon ausgegangen werden kann, dass es in dem Netzwerk nur einen temporären Engpass gab.

Fast Recovery : Der Fast Recovery Algorithmus wird verwendet, wenn nach einem Fast Retransmit noch weitere duplizierte Acknowledge Pakete ankommen. Dabei werden, wenn noch weitere Daten zum Senden bereitstehen diese gesendet, da davon ausgegangen wird, dass nur das Paket, das im Fast Retransmit gesendet wurde, verloren gegangen ist und die Datenübertragung ohne große Geschwindigkeitseinbußen fortgesetzt werden kann.

Timeout Wenn die Verbindung nicht mit den Fast Retransmit und Fast Recovery Algorithmen weitergeführt werden kann, oder erst gar keine Acknowledge Pakete ankommen, muss von einer größeren Überlastung oder Änderungen auf dem Übertragungsweg ausgegangen werden. Nachdem ein Paket einen bestimmten Zeitraum lang nicht bestätigt wurde, wird dieses nochmal gesendet. In dem Fall wird die Slow Start Threshold ebenfalls auf die Hälfte des Congestion Windows gesetzt. Das Congestion Window selber wird dabei jedoch auf eins gesetzt und die Übertragung mit dem Slow Start Algorithmus fortgesetzt.

2.4.7 Verbindungsabbau

Bei dem Beenden einer Verbindung muss sicher gestellt werden, dass eine Verbindung abgebaut werden kann, ohne dass es zu Datenverlust kommt. Ein Host, der keine Daten mehr zu senden hat, kann die Close Operation ausführen. Dabei sendet dieser ein Paket mit dem "FIN" Flag gesetzt, was der Gegenseite signalisiert, dass der Host die Verbindung beenden möchte. Er lässt die Verbindung aber weiterhin offen für eingehende Datenpakete, bis die Gegenseite signalisiert, dass sie bereit ist, die Verbindung zu beenden. Die Gegenseite reagiert auf das FIN-Paket entweder mit einem ACK-Paket, wenn sie noch Daten zu übertragen hat, oder mit einem FIN-Paket, wenn sie keine Daten mehr zu übertragen hat und die Verbindung beendet werden kann.

2.5 Dynamic Host Control Protocol (DHCP)

Mit größeren lokalen Netzwerken mit wechselnden Teilnehmer kam der Bedarf nach einer Zentralen Einrichtung, die die Verteilung der IP-Adressen innerhalb eines Netzwerkes verwaltet. Dafür wurde aufbauend auf den älteren Bootstrap Protokoll DHCP entwickelt. DHCP ist deswegen weitgehend kompatibel mit Bootstrap, weswegen mit Bootstrap Clients und Servern zusammengearbeitet werden kann. Neben der IP-Adresse können auch andere Parameter abgefragt werden. Zum Beispiel Gateway, Netzmaske, Zeitserver und Nameserver.

2.5.1 Paket Format DHCP (Bootstrap)

Op: Gibt den generellen Typ der Nachricht an. Ein Wert von 1 signalisiert eine Anfrage, wobei eine 2 eine Antwort signalisiert.

HType: Spezifiziert die Art der dem Netzwerk zugrunde liegende Hardware. Der Code 1 steht dabei für Ethernet.

HLen: Bezeichnet die Länge der physischen Adressen im Netzwerk. Im Falle von Ethernet Netzwerken sind dies 6 Byte.

Hops: Wird beim Absenden auf 0 gesetzt und von jedem Relay Agentum eins erhöht.

XID: Eine Identifikationsnummer mit der Server Antworten den Anfragen zugeordnet werden können.

Secs: Dieses Feld ist für das Bootstrap Protokoll ungenau definiert und wird oft nicht verwendet. Für DHCP wird es für die Zeit in Sekunden genutzt die vergangen ist, seit der Client damit begonnen hat nach einen neuen "Lease" zu fragen.

Flags: 8 Bits die für als Flags genutzt werden können. Das erste Bit wird gesetzt, falls die Nachricht als Broadcast gesendet wird, was den DHCP Server signalisiert, dass dieser über keine gültige IP Adresse verfügt.

CIAddr: Steht für "Client IP Adresse". Der Client schreibt seine eigene IP-Adresse in dieses Feld. Im Falle von DHCP kann dieses nur in den Zuständen BOUND, RENEWING oder REBINDING genutzt werden. In allen anderen Fällen bleibt dieses Feld auf Null.

YIAddr: Abkürzung für "Your IP Address". Wird vom Server gesetzt um den Client eine IP Adresse zuzuweisen.

SIAddr: Der Server gibt hier die Adresse des Servers an, dem der Client seine nächste Anfrage schicken soll.

GIAddr: Wird nur im Bootstrap Protokoll für die Kommunikation zwischen Client und Server verwendet, wenn diese nicht im selben Netzwerk oder Subnetz liegen. Wird im DHCP nicht dafür verwendet das Standardgateway anzugeben.

CHAddr: Hardware Adresse des Clients. Bei Nutzung von Ethernet die Mac-Adresse.

SName: Der DHCP Server kann hier optional seinen Namen angeben. Alternativ kann dieses Feld durch die Option "overload" Funktion auch für Optionen genutzt werden.

File: Kann genutzt werden um bei einen DHCPDISCOVER oder OFFER eine Bootdatei anzugeben.

Options: Für das Bootstrap Protokoll gibt es eine große Menge an Optionen, einige davon werden exklusiv für DHCP genutzt.

Die Anzahl und Art der verwendeten Optionen ist variabel. Der Aufbau von diesen folgt jedoch einen definierten Format. Die ersten 8 Bit eines Optionsblock enthalten den Code der Option, weitere 8 Bit geben die Länge des folgenden Datenfeldes an. Das Optionfeld beginnt im Falle von DHCP mit der "Magic Number"99.130.83.99 nur dann können die exklusiven DHCP Optionen genutzt werden. Dazu gehören:

Requested IP Address Diese Option kann während eines dhcp Discovers gesetzt werden um die Verfügbarkeit einer bestimmten IP-Adresse anzufragen.

Code: 50; Länge: 4 Byte;

IPAddress Lease Time Kann in einer DHCP-Request oder DHCP-Offer Nachricht gesetzt werden. Der Client kann dabei eine bestimmte Lease Time in Sekunden angeben.

Code:51; Länge 4 Byte;

Option Overload Diese option signalisiert, das Option Overload genutzt wird. Das bedeutet das weitere Optionen anstelle der Felder SNAME oder FILE geschrieben werden.

Code 52; Länge 1; Es gibt 3 mögliche Werte die geschrieben werden können.

- 1: Optionen stehen im File Feld.
- 2: Optionen stehen im SNAME Feld.
- 3: Optionen stehen in beiden Feldern.

DHCP Message Type dieses Feld ist bei DHCP Nachrichten immer vorhanden und gibt die Art der DHCP Nachricht an.

Code 53; Länge 1;

- 1 DHCPDISCOVER
- 2 DHCPOFFER
- 3 DHCPREQUEST
- 4 DHCPDECLINE
- 5 DHCPACK
- 6 DHCPNAK
- 7 DHCPRELEASE
- 8 DHCPINFORM

Server Identifier Die Option kann von einem Client bei einer DHCPREQUEST gesetzt werden, um bei Unicast Nachrichten die Adresse von einen bestimmter Server anzugeben. Ein DHCP-Server kann dieses Feld setzten, damit ein Client mehrere DHCP Offer unterscheiden kann.

Code 54; Länge 4;

Parameter Request List Es kann eine Liste von Parametern übergeben werden um die Werte von diesen bei einen Server anzufragen. Dazu kann eine beliebig Lange Folge aus DHCP/Bootstrap Optionscodes genutzt werden

Code 54; Länge n;

2.5.2 Ablauf

Zu Beginn eines DHCP-Vorgangs, wenn zum Beispiel ein Client hochgefahren wird, verfügt dieser weder über eine IP-Adresse, noch über andere Information die Netzertopologie betreffend. Als erstes sendet der Client ein Discover Paket. Dafür wird der Operationscode auf 1 gesetzt um eine request Paket zu signalisieren, die MAC-Adresse wird für die Physische Client Adresse verwendet, das Broadcast-Flag wird gesetzt und der DHCP-Message-Type wird auf Discover gesetzt. Aus diesen DHCP-Paket wird ein UDP-Paket erzeugt, mit den Quellport 68 und dem Zielpport 67. Die Nachricht wird als Broadcast gesendet.

Auf diese Anfrage können einer oder mehrere DHCP Server antworten. Wenn kein bestimmter in der DISCOVER-Nachricht spezifiziert wurde, schicken alle Server in den jeweiligen Netzwerk ein "OFFER". Diese Nachricht wird ebenfalls als Broadcast gesendet, da der Client noch keine eigene IP zugewiesen hat. Das OFFER enthält einen Vorschlag mit einer IP Adresse in dem Feld "Your IP Address". Anhand der "Transaction ID" und dem Feld CHADDR kann der Client die Offer eindeutig seiner Anfrage zuordnen.

Der Client antwortet auf das "OFFER" mit einer "REQUEST" Nachricht. Dafür wird die Option "Requested IP Address" gesetzt.

Auf das Request antwortet der Server wiederum mit einen ACK zu Bestätigung. Wenn der Client die Bestätigung erhält, prüft dieser ob die IP-Adresse schon genutzt wird, in dem er eine ARP Request für diese startet. Wird diese Beantwortet ist die Adresse schon in Benutzung. Ist dies nicht der Fall übernimmt der Client die Adresse. Die ACK Nachricht enthält die Lease-Zeit, welche angibt, wie lange eine IP gültig ist. Nachdem die hälfte der Lease-Zeit abgelaufen ist, sendet der Client eine weitere REQUEST-Nachricht. Da er zu diesem Zeitpunkt noch über eine gültige IP-Adresse verfügt sendet er die Nachricht nicht als Broadcast, sondern als Unicast direkt an den DHCP-Server, von dem er die IP zugewiesen bekommen hat. In dem Fall, das er auf die Request keine Antwort bekommen hat, startet er nach Ablauf der Lease Zeit mit einen DISCOVER.

Während dieses Vorgangs können neben der IP auch noch andere Informationen abgefragt werden. Wie beispielsweise die Adressen von DNS- und Zeitservern.

2.6 AMIDAR Prozessor

Bei der Klasse der AMIDAR Prozessoren handelt es sich um rekonfigurierbare Systeme, die zur Laufzeit an die Anwendung angepasst werden kann. Sie bestehen jeweils aus mehreren FUs, die über ein Token- und ein Datennetzwerk verbunden sind. Ein Token stellt dabei eine Mikroinstruktion da. Diese werden durch die Tokenmaschine aus den Prozessor Instruktionen generiert. Dazu kommen FUs für Framestack, Heap, ALUs und Hardwarebeschleuniger. Bei den in Hardware implementierten Prototypen des Fachgebiets Rechnersysteme wird Java-Bytecode eingesetzt.

3 Implementierung des TCP/IP Stacks

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein TCP Stack für die API des AMIDAR Microprozessor entwickelt. Darüber hinaus wurde der schon vorhandene IP-Stack an angepasst um die gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Zusätzlich wurde auch die Unterstützung für DHCP hinzugefügt.

3.1 Überblick

Vor Beginn dieses Projekts verfügte die AMIDAR Java API über Grundlegende Netzwerk Funktionen. Dazu gehört der Netzwerktreiber, ein IP-Stack mit ARP Funktionalität und ein UDP Stack. Neu geschrieben wurde im Rahmen dieses Projekts der Multithreading Fähige TCP Stack. Dieser wurde in die vorhandene Software Integriert. Desweiteren wurde der IP-Stack erweitert und optimiert.

Sowohl beim Senden als auch beim Empfangen von Datenpaketen greifen die einzelnen Module in einander über. Zum empfangen von Daten Prüft der Prozess des Netzwerktreibers ob neue Ethernet Frames vorliegen. Wenn das der Fall wird, eine Funktion im IP Stack aufgerufen, die die Ethernet Frames überprüft. Der IP-Stack unterscheidet die Pakete zwischen ARP und IP. ARP anfrage werden geprüft und gegebenenfalls beantwortet. Handelt es sich bei den Datagramm um ein IP-Paket, wird ein entsprechendes Objekt erzeugt und nach weiterer Überprüfung entweder an den UDP-Stack oder an den TCP-Stack übergeben. Die Stacks für TCP und UDP beinhalten jeweils einen Table mit den vorhandenen Verbindungen, die durch Ziel und Quell Port identifiziert werden können. Ihnen können gegebenenfalls die Erzeugten Pakete weiter gegeben werden, wo sie zwischengespeichert werden. Im Falle von UDP wird von den dieses die Payload ausgelesen, wenn auf "receive" Methode der UDP-Connection, von einen anderen Thread aufgerufen wird. Die TCP-Connections können jeweils in ihren eigenen Thread laufen, da eine Zeitnahe Verarbeitung der angekommen Pakete nötig ist um die Verbindung zu managen. In diesem Thread werden die angekommenen Pakete ausgewertet und die dazu entsprechenden Reaktionen berechnet und ausgeführt.

Wenn UDP Datenpakete versendet werden sollen, wird die SSend" Methode aufgerufen, die ein UDP-Paket erzeugt und diesen an den UDP-Stack weitergibt. Der wiederum ruft den erzeugt aus dem UDP-Paket ein IP-Paket. Mit dem die SSend" Methode des IP-Stacks aufgerufen wird. Die letztendlich einen Ethernetframe erzeugt und mit den EthernetWrapper den Sendevorgang startet.

Bei dem senden von Daten über TCP wird von der Anwendung der ebenfalls die SSend" Methode der TCP-Connection aufgerufen. Die werden dabei jedoch nicht sofort gesendet, sondern in einen Puffer zwischengespeichert, vorausgesetzt der aktuelle Status der Verbindung erlaubt das. Bei Ausführung des Threads der Verbindung, werden gegebenenfalls die zu übertragenden TCP-Pakete in IP Pakete umgewandelt und analog wie die UDP-Pakete versendet.

3.2 IP Stack

Der IP Stack erfüllt mehrere Funktionen, die für eine zuverlässige Netzwerkkommunikation benötigt werden. Dazu gehört, das Senden und Empfangen von IP-Paketen, als auch die Unterstützung der ARP Funktionalitäten.

3.2.1 IP Paket

Für die Repräsentation von IP-Paket wird die Klasse `IpPacket` genutzt. Diese Enthält die Daten des Pakets in einen Array. Neben Methoden, welche die einzelne Felder des Header zurück geben gibt es Konstruktoren die als Parameter TCP, UDP oder Ethernet Pakete entgegen nehmen. Des weiteren gibt es Methoden zur Berechnung der Checksumme und der Umwandlung von String Repräsentation von IP Adressen zu Integer Werten.

3.2.2 Empfangen von IP Paketen

Die Methode `readIpPackets()` des IP-Stacks, die vom Netzwerktreiber Thread aufgerufen. In dieser werden in einer Schleife die angekommenen Ethernet Pakete eingelesen und die IP Pakete dazu erzeugt. Dabei werden im Zweifelsfall Fragmente von fragmentierten Paketen zwischengespeichert, bis diese vollständig sind.

Bei den so erzeugten IP-Paketen wird das darüber liegende Protokoll ausgelesen.

Damit UDP und TCP Pakete zugestellt werden können müssen die jeweiligen Stacks im IP-Stack registriert werden. Nach der Registrierung können angekommene Pakete den jeweiligen Stack zugeordnet werden. Dafür implementieren beide Stacks die Function `"notifyByIpStack()"` der eine Liste mit angekommenen UDP-Paketen übergeben wird.

Fragmentierung

IP Pakete können während der Übertragung fragmentiert werden. Um über Netzwerke mit einer zu niedrigen Maximalen Segment Größe übertragen zu werden. Diese werden vom Empfänger defragmentiert.

Fragmentierte Pakete können nach der dem erzeugen erkannt werden, in dem das entsprechende Flag ausgelesen wird. Die Flag gibt nicht explizit an, das diesen Paket Teil eines größeren fragmentierten Pakets ist, sondern dass sie ein Teil eines fragmentierten Pakets sind und weitere Pakete Fragmente folgen. Das bedeutet, dass das letzte Fragment eines Pakets nicht das Flag gesetzt hat, dieses kann man daran erkennen, dass der Fragment Offset ungleich Null ist. Der IP Stack enthält eine Liste von für Fragmentierte Pakete, die Listen mit jeweils zusammengehörigen Fragmenten enthält. Wann immer ein Paket ankommt, bei dem die "More Fragments" Flag gesetzt ist oder die Data Offset ungleich Null ist, wird geprüft, ob dieses zu einem der fragmentierten Pakete gehört, und wird in diesem Fall an eine der Listen hinzugefügt. Die Zu-

gehörigkeit wird dabei anhand der Identification des IP Pakets geprüft.

Falls ein Paket ohne Flag einen anderen Fragmentierten Paket zugeordnet werden kann, ist dieses das letzte Fragment des ursprünglichen IP Pakets, mit dem das kombinierte Paket erzeugt werden kann.

Für diesen Zweck verfügt die Klasse `IpPaket` über die statische Methode `"fuseFragmentedIpPackets()"`, die eine Liste von zusammengehörigen IP-Paket Fragmenten annimmt. Diese werden auf Kompatibilität geprüft, wobei auch die Größe der kombinierten Nutzlast berechnet wird. Die Fragmente müssen neben der identischen Identifikation über die selbe Quell und Ziel IP-Adresse verfügen. Des weiteren müssen die Angaben des Frame Offsets mit der Paketlänge Plausibel sein. Anschließend werden die Pakete wird ein Array der entsprechenden Länge erzeugt und die Nutzlast der Pakete anhand des Frame Offsets zusammengesetzt. Danach kann der Konstruktor der IP-Paket Klasse aufgerufen werden, wobei ihm die neu kombinierte Nutzlast übergeben wird. Das neu erzeugte Paket wird zurückgegeben und von dem IP-Stack weiter verarbeitet.

3.2.3 Senden von IP Paketen

Der IP-Stack verfügt über die Methode `"sendIpPaket"`, die im Normalfall von dem TCP- oder dem UDP-Stack aufgerufen wird. Diese nimmt ein übergebenes IP-Paket an und generiert daraus einen Ethernet Frame. Daraufhin wird das Packet über Ethernet versendet.

3.2.4 Address Resolution Protokoll (ARP)

Das ARP Protokoll wird verwendet um in einen lokalen Netzwerk die IP Adressen zu den physischen MAC-Adressen aufzulösen. Ein Host, kann einer ARP-Request als Broadcast verschicken um die MAC-Adresse zu erfahren, über die der die Netzwerkressource mit der IP-Adresse zu erreichen ist.

Der IP-Stack verfügt über die Möglichkeit ankommende ARP Pakte zu verarbeiten. Für den Fall, das es sich bei einen ankommenden Datenpaket anstatt eines IP-Pakets um ein ARP-Paket handelt, wird geprüft, ob es sich um eine "Request" oder eine "Response" handelt. Für den Fall, das es sich um eine Request handelt, wird in einer entsprechenden Antwort die eigene physische MAC Adresse verschickt.

Beim versenden eines IP-Pakets muss ein Ethernet-Paket erzeugt werden. Dafür wird die MAC-Adresse unter der das Ziel oder die nächste Station auf dem Weg zu diesen erreichbar ist benötigt. Für diesen Zweck verfügt der IP-Stack über eine Hash-Map, die als ARP-Cache dient. In dem Fall, das für die IP kein Eintrag mit MAC-Adresse vorliegt, wird eine ARP-Request gesendet und auf deren Antwort gewartet. Nachdem die ARP-Response eingetroffen ist wird die IP-Adresse mit der MAC-Adresse verknüpft und in den dem ARP-Cache gespeichert.

3.3 TCP

Vor der Implementierung des TCP Stacks wurde überprüft, ob es schon in Java implementierte TCP-Stacks gibt. Die einzige in Frage kommende Implementierung war der `ejlP` TCP-Stack. Dieser verfügt jedoch über keinen Mechanismus für die erneute Übertragung verlorener Pakete, die von den darüber liegenden Protokoll gewährleistet werden müsste. Aus diesem Grund wurde entschieden eine eigene TCP-Variante geschrieben, die keine umfassende Änderung des IP-Stacks und des Treibers erfordert.

3.3.1 TCP Stack

Der TCP Stack stellt den Datenaustausch zwischen der einzelnen TCP-Verbindungen und dem IP-Stack her und ist dabei in der Lage mehrere Verbindung parallel offen zu haben und diese einzeln zu verwalten. Er enthält eine Map mit allen angelegten TCP Verbindungen. Es gibt eine Funktion um neue TCP-Verbindungen zu registrieren. Eine der wichtigsten Methoden ist `notifyByIpStack()`, die vom IP-Stack aufgerufen wird und eine List von TCP-Paketen übergibt. Der TCP Stack untersucht diese und überprüft sie anhand der Checksumme auf Korrektheit. Fehlerhafte Pakete werden aussortiert. Fehlerfreie werden abhängig von der Ziel-Port-Nummer an eine der TCP-Verbindungen übergeben, oder verworfen, wenn diese keiner Verbindung zugeordnet werden können.

3.3.2 TCP Verbindung

Die Klasse `TcpConnection` verwaltet die Zustände und Datenströme einer Verbindung. Die Klasse stellt zum einen die Verbindung zu der Anwendung da, und zum anderen enthält sie den Zustandsautomaten, der die Abläufe bei dem Aufbauen und Aufrechterhalten der Verbindung managen. Desweiteren befindet sich in dieser der Transmission Control Block (TCB), der nach dem Öffnen einer Verbindung die meisten für diese spezifischen Variablen enthält.

3.3.3 TCP-Paket

TCP-Pakete werden von einer Klasse repräsentiert, welche die Daten des Paktes in einen Array speichert, auf dessen Datenfelder mit entsprechenden Methoden gezielt zugegriffen werden kann. Außerdem gibt es Methoden zur Berechnung der Prüfsumme.

Struktur Zustandsautomat

Eine TCP-Verbindung muss auf eine Reihe von Ereignissen Abhängig von der aktuellen Situation reagieren, dabei bietet sich ein Zustandsautomat an, der jeden Zustand durch eine eigene Klasse abstrahiert. Da es bei der momentan von AMIDAR unterstützten JAVA Version 1.4 noch keine Unterstützung für Enumerationen gibt werden die einzelnen Zustände in einen Array von `TcpClass` gespeichert. `TcpClass` ist dabei das Interface das alle Statusklassen implementiert. Der aktuelle Zustand wird jeweils von der Integer Variable `actualState` angegeben, welche die

Position im Zustandsarray angibt. In dem Fall, das eine der zustandsabhängigen Methoden aufgerufen werden soll, wird diese auf das Array aufgerufen, wobei `actualState` als Index genutzt wird. Das von den Zustandsklassen implementierte Interface enthält folgende Methoden.

activeOpen Öffnet eine Verbindung und versucht mit dem übergeben Port und IP-Adresse den Drei-Wege-Handshake zu initiieren.

passiveOpen Öffnet eine Verbindung auf die von anderen Geräten ein Verbindungsaufbau initiiert werden kann.

send Schreibt übergebene Daten in den Sende Puffer des TCP-Stacks und erzeugt gegebenenfalls ein neues TCP-Paket, welches die übergebenen Daten verschickt.

receive Überprüft, ob genug Daten vorhanden sind, um diese an die Anwendung zu übergeben.

close Signalisiert, das alle Daten übertragen wurden, und die Verbindung abgebaut werden kann.

abort Bricht die Verbindung ab.

segmentArrive Untersucht und verarbeitet ein ankommendes TCP-Paket.

RexmtTimeout Wird aufgerufen, nachdem ein Timeout für ein Paket in der Retransmit Queue aufgetreten ist.

Jede dieser Methoden gibt als Integer den nächsten Zustands zurück. "Active Open", "Passive Open", "send", "receive", "close" und "abort" werden durch Aufrufe der Darüber liegenden Anwendung ausgelöst. "segmentArrive" wird aufgerufen, nachdem vom TCP-Stack angekommene Pakete übergeben wurden und der Thread der Verbindung ausgeführt wird. "RexmtTimeout" wird aufgerufen, wenn der retransmit Timer für ein Paket ausläuft. Um zu starke Schwankungen bei der RTO zu vermeiden wird eine geglättete Round trip

Neue Übertragung verlorener Pakete

Jedes gesendete Paket wird mit einen Zeitstempel versehen und der Retransmitqueue hinzugefügt. Der Zeitstempel des ersten Elementes von dieser, dem ältesten Paket in dieser, wird als Basis genommen um zu bestimmen, ob ein Timeout vorliegt. Die vergangene Zeit, bis ein Retransmit ausgelöst wird, wird nicht willkürlich gewählt, da es so bei Verbindung mit hoher Latenz Pakete neu versendet würden, die nicht verloren gegangen sind. Diese Zeit, RTO genannt, wird abhängig von der Round Trip Time (RTT) berechnet. Die Round Trip Time gibt die Zeit an die vergeht, nach dem ein Paket übergeben wurde, bis das Acknowledgement für dieses Paket eingetroffen ist. Um zu starke Schwankungen bei der RTO zu vermeiden wird eine geglättete Round Trip Time verwendet.

$$SRTT = (\alpha * SRTT) + ((1 - \alpha) * RTT)$$

$$RTO = \min[u, \max[o, (\beta * SRTT)]]$$

Der Glättungsfaktor α wird zwischen 0,8 und 0,9 festgelegt. β ist ein Varianzfaktor und wird auf einen Wert zwischen 1,3 und 2,0 gesetzt. u und o stellen die obere und untere Grenze da und werden Beispielsweise auf eine Sekunde bzw. eine Minute gesetzt.

Transmission Control Block(TCB)

Der Transmission Control Block enthält alle für die Verbindung wichtigen Variablen, abgesehen von der Zustandsvariable. Dazu gehören der eigene Port und der Port des Zielrechners, die eigene IP Adresse und die der Gegenstelle. Darüber hinaus werden die Sequenznummern sowohl zum Empfangen als auch zum Senden gespeichert. Des weiteren finden sich dort alle Variablen, die zur Congestion Control benötigt werden.

Zustände im Detail

Sofern nicht anders beschrieben löst eine Timeout eines Pakets eine neue Übertragung von diesem aus, wonach es an dem Ende der Retransmission Queue, mit einem neuen Zeitstempel gespeichert wird. Wenn ein Paket nach dem 5. Timeout noch nicht angekommen sein sollte, wird davon ausgegangen, dass keine nutzbare Verbindung zum Host mehr existiert und die Verbindung wird abgebrochen. Bei allen weiteren in den jeweiligen Zuständen nicht näher beschriebenen Aktionen wird eine IOException geworfen.

CLOSED In diesen Zustand wird auf einen auf bei einem "Active Open" ein Verbindungsaufbau gestartet. Dafür wird die initiale Sequenznummer zufällig generiert. Und ein SYN-Paket erzeugt. Anschließend wird die Send Unacknowledged Nummer auf den Wert der initialen Sequenznummer gesetzt und der Wert für die nächste Sendesequenznummer auf die um eins erhöhte initiale Sequenznummer gesetzt. Des weiteren wird der nächste Zustand auf SYN-SENT gesetzt.

In dem Fall, dass die Methode "passiveOpen" aufgerufen wird, wird in den Zustand Listen gewechselt.

In beiden Open Methoden wird die Verbindung im TCP-Stack registriert und es wird ein Transmission Control Block angelegt.

Alle anderen Usercalls werden mit Fehlermeldungen beendet.

LISTEN Im Zustand LISTEN wird auf den einen Verbindungsaufbau von einem externen Host gewartet. Ein Active Open Usercall kann auch in diesen Zustand noch ausgeführt werden, mit dem selben Ablauf wie im Zustand CLOSED. Bei einem "Receive"-Aufruf können noch keine Daten zurückgegeben werden, da keine aktive Verbindung aufgebaut ist. Der "Receive"-Usercall wird jedoch zwischengespeichert. Die Calls "close" und "abort" löschen den TCB und gehen in den Zustand CLOSED zurück. Bei eintreffenden Paketen wird geprüft, ob es sich um ein SYN-Paket handelt. In diesem Fall wird die initiale Sequenznummer berechnet und ein SYN-ACK Paket in die Paket-out-Queue abgelegt. Daraufhin geht die Verbindung in den Zustand SYN-RECEIVED über. Alle anderen eintreffenden Pakete deuten auf eine Fehlfunktion der Verbindung der Gegenstelle hin und werden mit einem RST Paket beantwortet.

SYN-RECEIVED In diesen Zustand werden Aufrufe der "send" und "receive" calls zwischengespeichert, um in einem späteren Zustand ausgewertet zu werden. Bei Ausführung eines "close" Calls wird geprüft, ob der Sendepuffer leer ist, wenn das nicht der Fall ist, verbleibt die Verbindung im aktuellen Zustand, andernfalls wird ein FIN-Paket gesendet, um das Ende der Verbindung einzuleiten. Wird die "Abort" Funktion aufgerufen, wird ein RST-Paket ge-

sendet, der TCB gelöscht und in den Zustand CLOSED zurück gegangen.

Ankommende Pakete werden, nach Überprüfung der Gültigkeit anhand der Sequenznummer, ausgewertet. Ist da angekommenes Paket ein ACK-Paket, wird das bestätigte Paket aus der RetransmitQueue entfernt und in den Established Zustand gewechselt.

Falls ein weiteres SYN- oder ein RST-Paket ankommen wird die Verbindung beendet.

SYN-SEND Die Aktionen für "send", "receive", "close" und "abort" werden genauso gehandhabt, wie im Zustand SYN-RECEIVED. Nach dem Eintreffen, von gültigen SYN-ACK Paketen wird in den Zustand ESTABLISHED gewechselt. Wenn ein eintreffendes Paket nur ein SYN-enthält wird der Zustand SYN-RECEIVED zurück gegeben und ein SYN-ACK-Paket gesendet. Bei einem Reset Paket wird die Verbindung abgebrochen. Allen anderen Paketen werden verworfen.

ESTABLISHED In diesen Zustand beginnt die "send" Operation mit dem Speichern der übergebenen Daten in den Sendepuffer. Anschließend wird das maximale Limit an Daten bestimmt, die noch versendet werden dürfen. Dafür wird das Minimum von "Congestion Window", und "receiverWindow" genutzt. Anschließend wird ein Datenpaket erzeugt, wobei darauf geachtet wird, dass das Limit, auch die Maximale Segment Größe nicht überschritten wird.

Ankommende Datenpakete werden einsortiert. Entspricht die Sequenznummer des Pakets der erwarteten Sequenznummer, können die Daten des Pakets in den Empfangspuffer geschrieben werden. Ist die Sequenznummer über der erwarteten Nummer, werden die Pakete in den "Out of Order" Puffer zwischen gespeichert. Diese werden wenn das fehlende Paket ankommt, hinter diesen in den Empfangspuffer einsortiert. Jedes angekommene Paket wird mit einem ACK-Paket quittiert. Dabei ist zu beachten, dass bei Paketen die nicht in der erwartenden Reihenfolge ankommen, die Sequenznummer des erwarteten Pakets als Acknowledge Nummer gesendet wird. Dadurch wird der Gegenseite signalisiert, dass dieses Paket möglicherweise verloren gegangen ist. Dadurch entstehen duplizierte ACKs, die für "Fast Retransmit" und "Fast Recovery" essentiell ist.

Des Weiteren wird das mit dem Paket mitgeschickte ACK überprüft. Entspricht die Acknowledge Nummer der letzten nicht bestätigten gesendeten Sequenznummer wird ein Zähler um eins hoch gesetzt um duplizierte ACKs zu erkennen. Bei einem mehr als drei Mal duplizierten ACK wird ein "Fast Retransmit" durchgeführt. Dabei wird die Slow Start Threshold halbiert und die Größe des Congestion Windows auf den Wert von diesen gesetzt. Zusätzlich wird das verlorene Paket aus der "Retransmit Queue" rausgesucht und sofort neu übertragen. Wenn ein gültiges nicht dupliziertes ACK eintrifft werden alle bestätigten Segmente aus der Retransmit Queue entfernt und das Congestion Window entsprechend der Slow Start und Congestion Avoidance Algorithmen erhöht. Falls das FIN-Flag bei einem gültigen Paket gesetzt ist, wird der Zustand Close Wait zurück gegeben.

In dem Fall, dass es zu dem Timeout eines Pakets kommt, wird die Slow Start Threshold ebenfalls halbiert und das Congestion Window auf den initialen Wert gesetzt.

FIN-WAIT-1 In diesen Zustand wird auf ankommende Pakete auf die selbe Art reagiert wie im Zustand ESTABLISHED mit dem Unterschied dass nach einem ankommenden gültigen ACK-

Paket in den Zustand FIN-WAIT-2 gewechselt wird. Ist zusätzlicher auch das FIN-Flag gesetzt wird in den Zustand TIME-WAIT übergegangen. Dazu kommt, das bei duplizierten ACK-Paketen kein "Fast Retransmit" mehr durchgeführt wird.

FIN-WAIT-2 Ankommende Pakete werden hier ebenfalls noch verarbeitet wie in der ESTABLISHED Phase mit dem Unterschied, das bei einen FIN-Paket der Zustand TIME-WAIT zurück gegeben wird.

CLOSE-WAIT In diesen Zustand funktioniert ein "Send" Call genauso wie im Zustand ESTABLISHED. Bei ankommenden Segmenten werden nur noch ankommende ACK-Pakete verarbeitet, da die Gegenstelle keine Daten mehr senden wird. Nach der Ankunft von SYN- oder RST-Paketen wird die Verbindung beendet.

Nach einen Aufruf von "close" Call wechselt die Verbindung in den Zustand LAST-ACK und sendet ein FIN-Paket.

LAST-ACK In diesen Zustand lösen alle Usercalls bis auf "Ssegment Arrive" eine IOException aus. Ankommende gültige Pakete werden daraufhin untersucht, ob diese das ACK zu dem gesendeten FIN-Paket ist. Ist dies der Fall wird die Verbindung beendet und in den Zustand CLOSED übergegangen. Bei der Ankunft eines RST oder SYN Pakets wird die Verbindung abgebrochen und ebenfalls der Zustand CLOSED zurück gegeben.

CLOSING Der Zustand Closing verhält sich weitgehend identisch zum Zustand LAST-ACK, mit dem Unterschied das wenn ein Ankommendes Paket das ACK für das gesendete FIN-Paket enthält in den Zustand TIME-WAIT übergegangen wird.

TIME-WAIT In diesen Zustand ist der Verbindungsabbau abgeschlossen. Die Verbindung bleibt dennoch ein paar Minuten offen um stark verzögerte Pakete zu bestätigen. Das eintreffen von RST- und SYN Paketen beendet die Verbindung sofort.

Options

TCP Optionen werden in einen Optionalen Bereich mit variabler Länge des Headers abgelegt. Um diese zu Repräsentieren wurde eine Klasse erstellt um den Optionsbereich des TCP-Headers abzubilden. Dafür wurde eine Methode geschrieben um die Optioncodes in eine übersichtlich Datenstruktur zu parsen. Zusätzlich git es eine Methode um Optionen in eine Datenstruktur zu überführen und daraus den Optionsblock im TCP Header zu generieren. Es wurden jedoch keine Unterstützung für konkrete Optionen implementiert.

3.4 Zero Copy

Die TCP und IP Pakete werden jeweils durch eine entsprechende Klasse repräsentiert. Die Objekte dieser Klasse enthalten jeweils ein Array, dass Header und Nutzdaten des Pakets enthält. Beide Klassen verfügen über einen Konstruktor, der jeweils die andere der beiden Klassen als Parameter entgegen nimmt. So kann beim Senden aus einen TCP-Paket ein IP-Paket erzeugt werden und beim Empfangen aus einen IP-Paket ein TCP-Paket erzeugt werden. Dabei stellt das TCP-Paket die Nutzlast des IP-Pakets da. Um in diesen Fall lange Kopiervorgänge zu ersparen wird es vermieden ein neues Array anzulegen und die Daten rein zu kopieren. Anstelle dessen

wird in der TCP-Paket Klasse im Array ein 20 Byte Puffer eingeplant, in dem der IP-Header später geschrieben werden kann. Bei der Erzeugung eines IP-Pakets aus einem TCP-Paket wird das im TCP-Paket erzeugte Array weiterverwendet und da die ersten 20 Byte leer sind, kann dort der IP Header geschrieben werden.

3.5 DHCP

Das Dynamic Host Control Protocol verwendet UDP in der Transportschicht um die Nachrichten zu senden. Bei der Implementierung muss eine Repräsentation der Pakete geschrieben werden um DHCP Pakete verarbeiten zu können. Des Weiteren wird eine Klasse benötigt, die den Ablauf und die Kommunikation verarbeitet.

3.5.1 DHCP-Paket

Die Klasse "DHCPPacket" repräsentiert DHCP Pakete. Diese enthält ein Integer Array, welches die Paketdaten enthält. Es gibt Getter Methoden, die mit Bitmaskierungen einzelne Datenfelder auslesen und deren Werte zurückgeben. Eine Schwierigkeit bei DHCP liegt darin begründet, dass die meisten wichtigen Informationen nicht in den festen Felder, sondern in den variablen Optionsteil abgelegt werden. Um diese auszulesen musste ein Parser geschrieben werden, der den Optionsbereich einliest und nach dem übergeben Optionscode sucht. Wenn dieser gefunden wurde, werden anhand der folgenden Längenangabe die Optionsdaten ausgelesen. Beim Parsen muss beachtet werden, dass Optionen byteweise eingelesen werden müssen, obwohl diese als 32 Bit Wörter vorliegen.

3.5.2 DHCP-Controller

Der DHCP-Controller enthält, den Thread, welcher den DHCP-Client steuert. Für die Ablaufsteuerung wurde ebenfalls ein kleiner Zustandsautomat implementiert. Sobald der Thread gestartet wurde, wird eine Discover Nachricht als Broadcast gesendet und in den Zustand "SELECTING" gewechselt. In diesen Zustand wird auf eine "OFFER" Nachricht des Servers gewartet. Die DHCP Nachrichten werden identifiziert in dem der Optionscode 53 aus dem Optionsblock ausgelesen wird. Der Datenwert dieser Option gibt die Art des DHCP-Paketes an. Sobald ein DHCP- "OFFER" eintrifft, wird die vorgeschlagene IP mit einer "REQUEST" angefragt und in den Zustand REQUESTING gewechselt. Bei dieser Anfrage wird die IP-Adresse mit dem Optionscode 50 angefragt. Anschließend wird auf die "ACK" Nachricht gewartet, in dieser die IP-Adresse bestätigt wird. Anschließend muss noch mit einer ARP Request geprüft werden, ob diese Adresse schon von einem anderen Host im Netzwerk verwendet wird.

3.6 Packet Builder

Ein Problem bei der Erzeugung der Paketobjekte war, dass bei jedes mal eine Reihe von Parametern gesetzt werden muss, die bis auf wenige Fälle den selben Standardwert haben. Die müssen dennoch bei jeder Paket Erzeugung gesetzt werden, was aufwendig und fehleranfällig ist. Um

das zu vermeiden können die Klassen für TCP- und DHCP-Pakete mit einen "Builder Pattern" erzeugt werden. Dabei wird eine spezielle Builder Klasse genutzt, die als Attribute die Parameter der Paket-klasse enthält. Diese werden vorinitialisiert. Über spezielle Setter Methoden können die Werte gesetzt werden. Diese geben als Rückgabewert das Builderobjekt zurück. Der letzte Aufruf auf das Objekt ist jeweils die "build" Funktion, welche den Konstruktor der Paketklasse aufruft und dieses zurück gibt. Ein derartiger Aufruf sieht Beispielsweise aus wie folgt.

```
1 new TcpPaketBuilder(tcb).setSeqNum(NextSendSeqNum).setAckNum(NextRecseqNum)
   .setAck().build()
```

Das erzeugen eines TCP-Pakets ohne die Verwendung des "Builder Patterns" sieht folgendermaßen aus.

```
1 new TcpPaket(payload,length,tcpOptions,connection,seqNum,ackNum,(short)
   winSize,flags,urgP);
```

4 Evaluation

4.1 Testaufbau

Zur Evaluation wurde ein Nexys Video FPGA Entwickler Board verwendet. Auf diesen wurde ein mit 100MHz laufender Java Prozessor der AMIDAR Klasse synthetisiert. Als Netzwerkschnittstelle wurde eine Steckkarte mit 2 Gigabit Ethernet RJ45 Schnittstellen verwendet. Diese wurde mit einem Patch Kabel zu der Ethernet Schnittstelle eines Laptops verbunden. Dieser verfügt über eine Realtec Gigabit Ethernet Schnittstelle. Des weiteren läuft auf dem Laptop Ubuntu 16.04 und eine "ISC-DHCPD" DHCP-Server. Für Testzwecke wurden außerdem diverse Java Programme genutzt, welche die Java Netzwerksocket nutzen.

4.2 Grundlegende Funktionen

Für das Testen der Grundfunktionen wurden mehrere Testszenarien verwendet. Zum einen wurde ein einfacher echo Server auf den AMIDAR laufen gelassen, der Ankommende Wörter zurück sendet. Dieser wurde auf einen oder mehreren Threads aufgeführt. Eine auf dem Laptop laufende Java Anwendung sendet dabei eingegebene Textnachrichten und wartet auf die Antwort des Servers, die in der Konsole ausgegeben wird. Dabei wird sowohl der Verbindungsaufbau als auch das Empfangen und Senden von Nachrichten getestet. Dies funktioniert auch mit mehreren offenen Verbindungen parallel.

4.3 Performanz

Für die Performance Messung wird eine Mischung von Daten verwendet, die entweder aus Wireshark ausgelesen wurden, in den Testanwendungen auf dem Laptop in eine .csv Datei geloggt wurden, oder während den Betrieb auf AMIDAR ermittelt und über UART ausgegeben. Die Latenz der einzelnen Pakete wurde Wireshark entnommen. Da Wireshark auf dem Laptop lief ist die Übertragungszeit des letzten Pakets, das vom Laptop in einen Handshake gesendet hat nicht gemessen. Ein 3 Wege Handshake, der von dem Laptop initiiert wurde betrug die RTT nach dem senden des SYN-Paketes bis zum Eintreffen des SYN-ACK-Pakets 15-30 Millisekunden. Momentan gibt es eine recht große Schwankung der Reaktionszeit. Diese Zeit wird durch den neuen Scheduler Vermutlich reduziert werden.

In dem Fall das die Übertragung von AMIDAR initiiert wird, benötigt der Laptop 900 Millisekunden, um auf die Anfrage zu reagieren. Nach weiter 40 Millisekunden trifft das ACK-Paket von AMIDAR ein.

In einen weiteren Test wurde zehn Verbindungen zum selben Zeitpunkt geöffnet über die jeweils in kurzen Abständen 500 Byte an Daten übertragen wurden. Diese Daten wurden von AMIDAR als Echo zurück gesendet. Die Latenz dieser Übertragung wurde in einer Logdatei gespeichert und betrug zwischen 1,4 und 3,5 Sekunden. Dabei entfiel der größte Teil der Zeit auf

das Auslesen der Daten aus den ankommenden Datenpaketen.

Ein Problem, das bei diesen Versuch sichtbar wurde ist die Schwankende Latenz. Die Dauer eines Timeouts wird bei TCP relativ zur RTT bestimmt. Nach dem schnellen SYN-ACK mit kleinen Paketen wird im PC ein entsprechend kurzes Zeitlimit für Timeouts gesetzt. Das hat zur Folge, dass wenn auf der Seite des AMIDAR Prozessors größere Datenpakete verarbeitet werden müssen, es zu Neuübertragungen von diesen kommt obwohl diese nicht verloren gegangen sind.

Die Übertragungsrate beim senden wurde ermittelt in dem ein Zufalls generiertes Datenpaket in einer Schleife gesendet wurde. Dabei wird eine Übertragungsrate von 160 kBit/s erreicht. Die Größe der einzelnen Datenpakete hat dabei nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Nettoübertragungsrate, was darauf schließen lässt, dass das Bottleneck bei dem Sendepuffer liegt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgabe dieser Bachelorarbeit war die Implementierung eines Multithreading fähigen TCP/IP-Stacks. Der eine stabile Datenübertragung über mehrere Paralleler Verbindungen gewährleisten kann. Außerdem sollte die entstandene Lösung evaluiert werden.

Wie dieser Ausarbeitung zu entnehmen ist wurde ein funktionierender TCP/IP-Stack implementiert und die vorhandenen Netzwerkfunktionen angepasst. Darüber hinaus wurde die Unterstützung für DHCP implementiert.

Wie in der Evaluation gezeigt wurde funktioniert der TCP-Stack wie erwartet, wobei die Geschwindigkeit noch verbessert werden kann. Eine Anpassung der Datenpuffer für das Senden und Empfangen wird die Performance deutlich verbessern. Darüber hinaus wird auch der Einbau des neuen Schedulers die Reaktionszeiten reduzieren.

Als zukünftige Erweiterungen kann die Unterstützung für TCP-Optionen implementiert werden, was die Stabilität und Geschwindigkeit in bestimmten Situationen weiter verbessern wird.

Durch die Unterstützung TCP können darauf aufbauende Protokolle wie z.B. HTTP, FTP oder SMTP implementiert werden.

Abkürzungsverzeichnis

CPU central processing unit

FPGA Field Programmable Gate Array

RTT Round Trip Time

AMIDAR Adaptive Microinstruction Driven ARchitecture

IP Internet Protocol

TCP Transmission Control Protocol

UDP User Datagram Protocol

API Application Programming Interface

Abbildungsverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [BUG] *BUG Xilinx XDL Programm*. <http://forums.xilinx.com/t5/Spartan-Family-FPGAs/A-bug-for-Spartan-6/td-p/271026>
- [ELF] *Executable and linkable Format*. <http://www.linux-kernel.de/appendix/ap05.pdf>
- [GNU] *GNU - make*. <http://www.gnu.org/software/make/manual/make.html>
- [OSE] *Open Source ELF-Library*. <https://www.hpi.uni-potsdam.de/hirschfeld/trac/SqueakMaxine/browser/com.oracle.max.elf?rev=1d81ff0c9a2a8a101fe33f4ac1495decc6147517#src/com/oracle/max/elf>
- [UCS] *XDL Use Case Senarios*. http://www.cs.indiana.edu/hmg/le/project-home/xilinx/ise_5.2/help/data/xdl/xdl-ucs-ext.html
- [XDL] *Xilinx Design Language*. http://www.cs.indiana.edu/hmg/le/project-home/xilinx/ise_5.2/help/data/xdl/xdl.html