TSN basierte automatisch etablierte Redundanz für deterministische Kommunikation

Franz-Josef Götz¹, Feng Chen², Marcel Kießling¹, Jürgen Schmitt³

¹Siemens AG
Process Industries and Drives Division
Technology and Innovations
PD TI AT 4
Gleiwitzer Str. 555, 90475 Nürnberg
franz-josef.goetz@siemens.com
kiessling.marcel@siemens.com

²Siemens AG
Digital Factory
Technology and Innovations
DF TI AT 2
Gleiwitzer Str. 555, 90475 Nürnberg
chen.feng@siemens.com

³Siemens AG
Digital Factory
Customer Services
DF CS SD EH 1 3
Werner-von-Siemens-Str. 65, 91052 Erlangen
juergen.jues.schmitt@siemens.com

Zusammenfassung. Mit der Einführung von Industrie 4.0 werden neue Anforderungen an industrielle Netzwerke gestellt. Eine der neuen Anforderungen ist, deterministische Kommunikation nicht nur in der Maschine, sondern auch Maschinenübergreifend zu ermöglichen. Deterministische Maschinen-Maschinen Kommunikation soll in Zukunft auch Dynamik, Robustheit und hohe Verfügbarkeit unterstützen. Um herstellerübergreifende deterministische Kommunikation auf Ethernet basierenden Netzwerken umzusetzen, werden Standards benötigt. Die IEEE 802.1 Arbeitsgruppe für Time-Sensitive-Networking (TSN) hat sich zur Aufgabe gestellt Bausteine für deterministisches Ethernet für zeitkritische Applikationen zu standardisieren, welche auch die erweiterten industriellen Anforderungen erfüllen. Dieser Beitrag erläutert, wie sich die Bausteine für klassenbasierte Streams zusammenfügen lassen um flexible, robuste und redundante deterministische Kommunikation zu ermöglichen.

1 Einleitung

In der IEEE 802.1 Arbeitsgruppe Audio-Video Bridging (AVB) wurden die Grundlagen für deterministisches Ethernet mit dem Ende der Arbeiten im Jahr 2012 gelegt. Die wesentlichen Ziele waren bestimmbare maximale Latenz und berechenbarer maximaler Ressourcenbedarf an jedem Bridge-Port, um jegliche Art von Überlast auszuschließen. Um dies zu erreichen wurden verschiedene Bausteine als Erweiterung von Ethernet spezifiziert. Dazu gehörte der Credit-Based Shaper (CBS, IEEE Std 802.1 Qav-2009) und das Stream Reservation Protocol (SRP, IEEE Std 802.1Qat-2010) basierend auf einem Modell mit klassenbasierten Streams.

2 Mechanismen für Quality of Service (QoS)

Um unterschiedliche QoS Anforderungen für unterschiedliche Märkte zu erfüllen, hat die IEEE802.1 im Rahmen von AVB und TSN eine Reihe an Mechanismen und Protokollen spezifiziert. Die IEEE 802.1 bietet heute zwei Kategorien von Lösungen an, „Reserved Streams“ und „End-to-End (E2E) Scheduled Streams“, wie in der [Abbildung 1](#) dargestellt.

Abb. 1. Abhängigkeit Control-Plane zu Stream Kategorien

Abbildung 1 stellt grob die unteren „Planes“ von Bridging dar, die für Streams von Bedeutung sind. Während die Data-Plane für QoS im Wesentlichen den Fokus auf das Leeren der Sendequues der Bridges auf Links richtet, ist die Control-Plane für das Registrieren bzw. Einrichten von Streams zuständig.

Reserved Streams setzt in der Control-Plane Reservierung voraus. Reservierung selbst wiederum hat Anforderungen an die Data-Plane. Die dafür eingesetzten Data-Plane Mechanismen (z.B. Shaping) müssen sicherstellen, dass Ressourcen und Latenz

per Hop mit lokalem Wissen berechenbar werden. Die Kombination Shaping und Reservierung schafft eine skalierbare Grundlage für eine verteilte, dynamische und automatische Konfiguration von Streams in Ethernet basierten Netzwerken.

Für zeitkritische Applikationen wurden und werden in der IEEE 802.1 TSN Task Group, dem Nachfolger der AVB Task Group, weitere Shaping Mechanismen mit verbesserten Eigenschaften entwickelt. So stellt z.B. Cyclic Queuing and Forwarding (CQF, IEEE Std 802.1Qch-2017) sicher, dass alle Frames von Streams in einem Intervall um einen Hop weitertransportiert werden. Künftiges Asynchronous Traffic Shaping (ATS, IEEE P802.1Qcr) dagegen stellt sicher, dass der zeitliche Mindestabstand zwischen den Frames eines Streams in jedem Hop eingehalten wird. Eine Anforderung wie „Bounded Low Latency“ lässt sich auch mit Shaping erfüllen, wenn man die Interferenzen per Hop begrenzt.

Abb. 2. Bridge mit Interferenz

Abbildung 2 stellt Interferenz in einer Bridge an Port P5 dar, verursacht durch Traffic von den Ports P1, P2, P6 und P7. Traffic von Port P3 bzw. P4 wird an Port P8 bzw. P7 weitergeleitet und hat keine Interferenzen zu dem Traffic am Ausgangsport P5. Allgemein tritt Interferenz in einer Bridge immer dann auf, wenn Traffic von unterschiedlichen Eingangsports zu einem gemeinsamen Ausgangsport weitergeleitet wird.

E2E Scheduled Streams setzen in der Control-Plane die Berechnung eines Schedules („Scheduling“) für Streams voraus. Üblicherweise wird Scheduling mit „Gating“ Mechanismen auf der Data-Plane in Verbindung gebracht. Scheduling kann aber auch mit „Shaping“ Mechanismen verknüpft werden. Scheduling bezieht sowohl Endgeräte als auch das Netzwerk mit ein. Um für zeitkritische industrielle Applikationen wie Umrichter die Anforderung für niedrigste Latenz per Stream zu erfüllen, wurde der Time-Aware Scheduler (TAS) mit einem Time-Division Multiplexing (TDM) Verfahren, das auf Zeit basierendem „Gating“ (**Abbildung 3**) aufbaut, unter „Enhancements for Scheduled Traffic“ (IEEE Std 802.1Qbv-2015) spezifiziert.

Abb. 3. „Gating“ Erweiterungen für Scheduled Traffic

Da TAS nur Transmission Gates per Transmission Queue“ festlegt, wird „Gating“ nur per Traffic Class, nicht für einzelne Streams, unterstützt. D.h. eine Gruppe von E2E Scheduled Streams sind einer Traffic Class zugeordnet. Ist nun niedrigste Latenzen per Stream gefordert, muss die In-Class Interferenz innerhalb der Traffic-Class für E2E Scheduled Streams ausgeschlossen werden. Dazu ist Scheduling für jeden einzelnen Stream unter Einbeziehung der gesamten Gruppe erforderlich. Zusätzlich wird für TAS eine hochgenaue und robuste Zeitsynchronisation zwischen den Bridges und den Endgeräten vorausgesetzt. Die Berechnung des Scheduling für das Einspeisen von Streams ohne bzw. mit festgelegter Interferenz erfordert eine zentrale Berechnung. E2E Scheduled Streams setzten einen Centralized Network Configuration (CNC) und damit Remote-Management in den Netzkomponenten voraus. Um die für E2E Scheduled Streams erforderlichen Mechanismen in den Bridges und Endgeräten zu konfigurieren sind Parameter für Remote-Management in dem IEEE Std 802.1Qcc-2018 spezifiziert.

Abbildung 1 zeigt auch, dass sich die Data-Plane Mechanismen, die für Shaping und Gating standardisiert wurden, verschiedenen Ausprägungen der Control-Plane zuordnen lassen. So wird z.B. im Rahmen des Labs Network Industrie 4.0 (LNI4.0) TSN Testbed ein Demonstrator entwickelt, der zeigt, wie sich TAS mit einem verteilten Protokoll zur Stream Reservierung verknüpfen lässt.

3 Industrielle Anforderungen an Echtzeitkommunikation

Im industriellen Umfeld gibt es eine Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen. Besonders in Bezug auf Latenz und Verfügbarkeit ist die Varianz der Anforderungen vielfältig.

3.1 Latenz

Eine oft gewählte Darstellung der Automatisierungspyramide für industrielle Control Anwendungen zeigt [Abbildung 4](#).

Abb. 4. Automatisierungspyramide für industrielle Control Anwendungen

Aus der [Abbildung 4](#) wird ersichtlich, dass industrielle Control Anwendungen im Maschine/Field Level typischerweise andere Anforderungen an die Echtzeitkommunikation haben als Control Anwendungen im Cell Level, wo Maschinen miteinander kommunizieren. Abhängig von der industriellen Control Anwendung sind die Anforderungen an Antwortzeiten. Diese können im Bereich von wenigen zehn Mikrosekunden bis zu einigen hundert Millisekunden liegen. Sowohl E2E Scheduled Streams als auch Reserved Streams sind im Prinzip in der Lage, diese Anforderungen an die Antwortzeiten zu erfüllen. Welche Ausprägung an Control-Plane man wählt, hängt von zusätzlichen Anforderungen ab, die man an ein echtzeitfähiges Kommunikationssystem stellt.

In der IEEE 802.1 TSN Task Group wurden und werden eine Reihe an Mechanismen standardisiert, um zeitsensitive Anwendungen zu unterstützen. Folgende Kriterien sollten beispielsweise bei einer Entscheidung für ein Ethernet basiertes Kommunikationssystem miteinbezogen werden:

Benötigen in einem konvergenten Netzwerk Anwendungen, die sich das Netzwerk teilen, kürzeste Latenz per Stream oder ist eine bestimmbare maximale Latenz per Stream ausreichend?

Welche bestimmbare maximale Latenz ist über welchen Network-Diameter gefordert oder soll Determinismus unabhängig von der Ausdehnung des Netzwerks unterstützt werden können?

Soll ein Kommunikationssystem eine Minimierung der Austauschzeit für Echtzeitdaten unterstützen?

Soll ein Kommunikationssystem unterschiedliche „Latenzklassen“ für verschiedene Anwendungen gleichzeitig unterstützen?

Kann sich das Kommunikationssystem auf bestimmte Vorzugstopologien beschränken (z.B. Beschränkung auf Linien und Ringe)?

Soll ein Kommunikationssystem dynamische Kommunikationsbeziehungen (unabhängig von der Reihenfolge des Einrichtens) mit Echtzeitanforderungen unterstützen?

Wieviel Prozent der verfügbaren Bandbreite im Netzwerk soll für Echtzeitkommunikation nutzbar sein?

3.2 Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit von echtzeitfähiger Kommunikation spielt eine wichtige Rolle für industrielle Anwendungen. In der Automatisierung tauschen industrielle Control Anwendungen ihre Echtzeitdaten periodisch in sehr kurzen Zyklen aus. Abhängig von der Control Anwendung liegt die Periodendauer der Applikation im Bereich von wenigen zehn Mikrosekunden bis hin zum vielfachen von 10ms. Eine industrielle Control Anwendung kann typischerweise nur wenige Applikationsperioden lang ohne neu empfangene Echtzeitdaten arbeiten.

Link Fehler in einem Bridged Ethernet Netzwerk sind eine häufige Ursache für das Ausbleiben von neuen Daten. Für das „Reparieren“ eines Link Fehlers benötigen Protokolle wie das in der IEC spezifizierte Media Redundancy Protocol (MRP, IEC Std 62439-2) typischerweise zwischen dreißig und einigen hundert Millisekunden. Schon allein diese Zeit ist für viele industrielle Control Anwendung nicht akzeptabel.

Deshalb wurden Techniken entwickelt, die es ermöglichen Daten und Duplikate auf redundanten Wegen von einer Quelle zum Ziel zu übertragen. In der IEC Std 62439-3 wurden dafür zum einen das Parallel Redundancy Protocol (PRP) und High-availability Seamless Redundancy (HSR) standardisiert. PRP und HSR haben gemeinsam, dass redundant übertragene Frames mit Hilfe einer Sequenznummer erkannt werden.

PRP geht davon aus, dass jedes Endgerät an zwei LAN's, bezeichnet als LAN_A und LAN_B, angeschlossen ist. Endgeräte, die als Quelle für Daten agieren, speisen diese in LAN_A und LAN_B ein. Endgeräte, die als Empfänger agieren, empfangen die Daten von LAN_A und LAN_B, filtern anhand der Sequenznummer die Duplikate, und leiten dann die Daten an die Anwendung weiter. Die Sequenznummer wird als Trailer im PRP-Frame übertragen. PRP wurde vor allem für Ende-zu-Ende Redundanz entwickelt.

Endgeräte, die die HSR Mechanismen unterstützen, können sowohl einfach als auch redundant an einem auf Ring-Topologie basierenden HSR Netzwerk angeschlossen sein. Frames, die mit Hilfe der HSR Mechanismen übertragen werden, haben im Header eine zusätzliche HSR Kennung mit Sequenznummer. Bei HSR geht man davon aus, dass jede Netzkomponente das „Replizieren“ bzw. „Eliminieren von Duplikaten“ unterstützt. Frames mit HSR Kennung werden im Ring geflutet. Um zirkulierende Frames mit HSR Kennung zu verhindern, werden in jeder Netzkomponente an jedem Port Duplikate gefiltert.

Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER, IEEE Std 802.1CB-2017) hat einige der Grundprinzipien von PRP und HSR aufgenommen um z.B. Streams redundant im Netzwerk übertragen zu können. Obwohl FRER hauptsächlich als Technologie für „Seamless Redundancy“ entwickelt wurde, kann FRER grundsätzlich auch dazu verwendet werden, die Wahrscheinlichkeit von Frame Verlusten auf Grund von Fehlern auf der Übertragungsstrecke zu minimieren. Mit FRER wurde die Möglichkeiten geschaffen, Ende-zu-Ende Redundanz zu unterstützen, ohne dafür zwei LANs vorauszusetzen. Aber auch „Seamless Redundancy“ mit einem Redundancy Tag (R-Tag) wird unterstützt. Redundante Streams werden im Standard für FRER als „Compound Streams“ bezeichnet, die sich aus „Member Streams“ zusammensetzen.

Abb. 5. Ende-zu-Ende Redundanz mit FRER in den Endgeräten

Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für Redundanz mit FRER in den Endgeräten. Ein Talker sendet für einen Compound Stream zwei Member Streams, die sich auf der Data-Plane anhand des VLAN Identifier (VID) unterscheiden. Die VID der einzelnen Member Streams wird dazu verwendet, diese entlang der disjunkten Pfade zum Listener zu leiten.

Abb. 6. Redundanz mit FRER im Netzwerk

Die mit FRER eingeführten Mechanismen zum Replizieren von Frames bzw. zum Eliminieren von Duplikaten sind nur in bestimmten Bridges für einen Stream abhängig von der Position des Talkers bzw. des Listeners im Netzwerk notwendig.

FRER in einem Netzwerk, wie in [Abbildung 6](#) dargestellt, kann auch dazu verwendet werden, um die Verfügbarkeit eines Netzwerkes weiter zu erhöhen. Pro Segment, im obigen Beispiel ein Ring, kann mit FRER je ein Link Fehler beherrscht werden, ohne dass die Ende-zu-Ende Kommunikation zwischen Talker und Listener unterbrochen ist. Dieses dargestellte Prinzip wird auch als „Segment Protection“ bezeichnet.

Die folgenden Kapitel beschränken sich ausschließlich auf das Reserved Stream Modell, da der in den späteren Kapiteln beschriebene Ablauf in der Control-Plane auf ein verteiltes Protokoll zur Stream Reservierung aufbaut.

4 Stream Reservation

Im Jahr 2007 hat die IEEE 802.1 AVB Task Group mit der Entwicklung eines Protokolls begonnen, bekannt als SRP, dass Endgeräten die Möglichkeit gibt, für einen Stream sowohl Pfad, Bandbreite als auch Ressourcen in einem Bridged Ethernet Netzwerk zu reservieren. Die Quelle eines Streams bezeichnet SRP als Talker, während die Senke als Listener bezeichnet wird.

SRP gibt einem Endgerät die Möglichkeit, sich als Talker für einen bestimmten Stream in einem Netzwerk, mittels einer Stream Beschreibung, in SRP Talker-Advertise Attribut genannt, zu registrieren. Jede Netzkomponente registriert bei sich für jedem Stream das Talker-Advertise Attribut und propagiert es zur nächsten Bridge weiter. Neben der Talker-Advertise Attribut Registrierung speichert jede Bridge bei sich auch ab, über welchen Empfangsport das jeweilige Talker-Advertise Attribut empfangen wurde.

Die wesentlichen Parameter des Talker-Advertise Attributes sind:

- Die Parameter zur Identifizierung eines Streams auf der Data-Plane:
Ziel MAC Adresse, Priorität und VID.
- Die Bandbreitenanforderung für einen Streams:
Sie setzt sich aus den Parametern MaxFrameSize und MaxIntervalFrames zusammen.
- Die per Hop akkumulierte maximale Laufzeit:
Sie wird als AccumulatedLatency bezeichnet.

Mit MaxIntervalFrames wird festgelegt, wie viele Frames ein Talker maximal per sog. Class-Measurement-Interval (CMI) in einem Stream sendet. Das CMI ist klassenspezifisch und schafft eine gemeinsame Basis zur Interpretation der Stream Bandbreitenanforderung. Der Ressourcenbedarf für einen Stream kann somit in einer Bridge lokal berechnet werden.

Traffic Shaper wie z.B. CBS und ATS schließen mit ihrer „Shaping“ Funktion aus, dass Schwebungseffekte für Frames von Streams im Netzwerk auftreten, so dass die lokal berechneten und reservierten Ressourcen immer ausreichend sind.

SRP sieht vor, dass sich einer bzw. mehrere Listener für einen Stream mit Hilfe des Listener-Join Attributes registrieren können. Das Listener-Join Attribut wird im Netzwerk Hop-bei-Hop über den registrierten Empfangsport des Talker-Advertise Attributes zurück zum Talker propagiert. Jede Bridge, die das Listener-Join Attribut auf dem Pfad zurück zum Talker empfängt, registriert es auch bei sich. Neben der Registrierung des Listener-Join Attributes erfolgt die eigentliche Stream Reservierung:

Jede Netzkomponente prüft für sich, ob genügend Bandbreite und Ressourcen an den jeweiligen Ports für den Stream vorhanden sind. Ist dies der Fall, wird das Weiterleiten in der Bridge für den Stream eingerichtet und der Traffic Shaper am Ausgangsport entsprechend der für Streams angeforderten Bandbreite konfiguriert.

Das Versenden der Talker-Advertise bzw. Listener-Join Attribute muss vom jeweiligen Talker bzw. Listener zur sogenannten „Lebendüberwachung“ periodisch wiederholt werden. Bricht das periodische Senden von Talker-Advertise bzw. Listener-Join Attributen für einen Stream ab, wird die Stream Reservierung rückgängig gemacht. Dafür werden die jeweiligen Registrierungen in den Bridges gelöscht und die entsprechenden Ressourcen freigegeben. Das Stream Reservierungsprotokoll unterstützt somit eine wesentliche Anforderung für dynamische Kommunikationsbeziehungen mit Unterstützung für Diagnose.

Damit sich der Pfad für eine Stream Reservierung nicht ständig ändert, wird für das Propagieren der Talker-Advertise Attribute eine schleifenfreie Topologie in Form eines Spannbauums vorausgesetzt. Im IEEE 802.1 Standard spricht man von einer „Aktiven Topologie“, die mit Hilfe der VID adressiert wird. Eine „Aktive Topologie“ kann durch ein physikalisch schleifenfreies Netzwerk bzw. mittels Algorithmen zur Pfadberechnung entstehen.

Abb. 7. Stream Reservierung basierend auf Shortest Path Tree (SPT)

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel zur Etablierung von zwei Streams. Im Netzwerk gibt es zwei Talker (Endgeräte E1 und E6) sowie drei Listener (Endgeräte E2, E3 und E5). Außerdem werden zwei Bäume dargestellt. Mit rot wird der Shortest Path Tree (SPT) von Bridge B5 dargestellt, während mit blau der SPT von Bridge B1 dargestellt wird. Das Endgerät E1 mit Talker von Stream 1 ist an Bridge B1 angeschlossen, während Endgerät E6 mit Talker von Stream 2 an Bridge B5 angeschlossen ist. Um die Eigenschaften von SPT auszunutzen wird für Stream 1 das Talker-Advertise Attribut A1 über den blauen Baum (Blue Shortest Path Tree of B1) während die für Stream 2 das Talker-Advertise Attribut A2 über den roten Baum (Red Shortest Path Tree of B5) verteilt wird. Der Listener eines Endgerätes, z.B. E5, registriert sich für das Empfangen von z.B. Stream 1 mit Hilfe des Listener-Join Attributes J1. Das Listener-Join Attribut J1 wird vom Listener über das Netzwerk Hop-zu-Hop zurück zum Talker, in diesem Fall zu E1, propagiert. Nach dem gleichen Prinzip werden auch die Streams für die Listener der Endgeräte E2 und E3 etabliert.

Mit der Hop-zu-Hop Propagierung des Talker-Advertise Attributes werden nicht nur die Wegeigenschaften (z.B. kürzester Weg) von Streams festgelegt, sondern es wird auch die maximale Latenz vom Talker zu allen potentiellen Listnern durch das Netzwerk ermittelt. Jede Netzkomponente addiert beim Weitergeben des Talker-Advertise Attributes ihre „Worst-Case“ Latenz zur „AccumulatedLatency“. Der „Worst-Case“ per Hop ist abhängig von den maximal zugelassenen Interferenzen, verursacht durch Traffic Classes mit höherer Priorität, durch den Traffic in der gleichen Traffic Class und durch die maximale Größe von Frames der Traffic Classes mit niedrigerer Priorität.

Legt man einen einzelnen Baum als Eigenschaft für den Pfad zugrunde und im Netzwerk wird ein Link weggenommen bzw. es tritt ein Link Fehler auf, hat dies Auswirkung auf die Topologie und damit auch Auswirkung auf dem Baum. D.h. wenn sich ein Baum ändert, ändern sich damit auch möglicherweise die Wege für das Propagieren von Talker-Advertise Attributen und damit der Pfad für Streams. Dies hat zur Folge, dass aufgrund von Topologie-Änderungen etablierte Stream Reservierungen abgebaut und auf Basis der neuen Topologie wieder automatisch aufgebaut werden. So wie z.B. für die Dauer eines Verbindungsaufbaus keine Zeit garantiert werden kann, kann auch für die Dauer einer Stream Reservierung keine Zeit garantiert werden. Für Anwendungen, die nur über eine eng begrenzte Zeit ohne neue Daten arbeiten können, ist Stream Reservierung basierend auf einem einzelnen Baum mit Umschaltredundanz zwischen Talker und Listener nicht geeignet.

5 Redundante Stream Reservierung

Um Determinismus, wie er für Reserved Streams bzw. für E2E Scheduled Streams entwickelt wurde, für Anwendungen mit hohen Verfügbarkeitsanforderungen nutzbar zu machen, werden Streams über möglichst disjunkte redundante Pfade zwischen Talker und Listener ausgetauscht. Damit wird sichergestellt, dass ein einzelner Link Fehler im Netzwerk nicht zu einer Unterbrechung des deterministischen Datenaustausches führt.

Damit dafür in einem beliebigen Netzwerk möglichst disjunkte redundante Bäume gefunden werden, sind im Standard für Path Control and Reservation (PCR, IEEE Std 802.1Qca-2015) Möglichkeiten standardisiert worden. PCR spezifiziert ein verteiltes Verfahren zur Ermittlung von möglichst disjunkten redundanten Bäumen.

Die Wurzel von sog. Maximally Redundant Trees (MRTs), über die Streams redundant übertragen werden, ist immer die Bridge, über deren Port, sogenannten Edge-Port, das Gerät des Talkers angeschlossen ist. In den folgenden Kapiteln wird diese Bridge als „Talker-Bridge“ bezeichnet. Alle anderen Bridges mit Edge-Ports werden als „Listener-Bridge“ bezeichnet.

Abb. 8. Leiter-Topologie mit Maximally Redundant Trees (MRTs)

Abbildung 8 zeigt eine sogenannte Leiter-Topologie mit zwei möglichst disjunkten redundanten Bäumen, deren gemeinsame Wurzel die sogenannte Talker-Bridge ist. Netzwerke, basierend auf Ethernet, setzen eine konsistente VLAN Konfiguration voraus. Die VLAN Konfiguration weist jeder VID eine aktive Topologie (einem Baum) zu.

5.1 End-to-End Frame Replication and Elimination for Reliability (E2E FRER)

Die folgende Beschreibung für E2E FRER geht davon aus, dass Endgeräte Streams redundant in ein Netzwerk einspeisen. Die redundant eingespeisten Streams werden im Netzwerk über möglichst disjunkte Pfade übertragen und ein Listener empfängt Duplikate eines Streams.

Mit Hilfe der VLAN Konfiguration wird festgelegt, welche VIDs für E2E FRER verwendet werden. Anhand der Stream Destination-MAC-Address, der verwendeten VID und eingetragenen Sequenznummer können Duplikate erkannt werden. Damit eine Anwendung im Listener Endgerät nur einmal die Daten empfängt, werden Duplikate vom Listener eliminiert. Für Bridges sind keine besonderen Erweiterungen notwendig um E2E FRER zu unterstützen.

Die Stream Reservierung erfolgt für jeden einzelnen Member Stream, der zu einem Compound Stream gehört. Die beiden Stream Reservierung lassen sich anhand der Stream ID und VID identifizieren. Der Talker eines Compound Streams registriert sich und die entsprechenden Member Streams in einem Netzwerk durch das Senden von zwei Talker-Advertise Attributen. Die beiden Talker-Advertise-Attribute unterscheiden sich lediglich an der VID. Jede Bridge registriert bei sich die Talker-Advertise Attribute und propagiert diese über die entsprechenden Ports der jeweiligen aktiven Topologie weiter.

Abb. 9. Ende-zu-Ende Talker-Advertise Attribut Propagierung

Abbildung 9 zeigt beide Talker-Advertise Attribute für einen Compound Stream, die entsprechend ihrer VID über zwei maximal disjunkte Bäume propagiert werden. Listener für einen Compound Stream registrieren sich mit Hilfe von zwei Listener-Join Attributen, die sich ebenfalls anhand der VID unterscheiden. Jede Netzkomponente registriert empfangene Listener-Join Attribute und gibt diese über den registrierten Empfangsport des entsprechenden Talker-Advertise Attributes zurück.

Abb. 10. Ende-zu-Ende Listener-Join Attribut Propagierung

Abbildung 10 zeigt beide Listener-Join Attribute für einen Compound Stream, die entsprechend ihrer VID über zwei maximal disjunkte Bäume zurück zum Talker propagiert werden.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass der Reservierungsvorgang zur Unterstützung von End-to-End FRER vergleichbar ist mit der Vorgehensweise der Reservierung für einzelne Streams, ausgenommen von den unterschiedlichen VIDs in den Talker-Advertise bzw. Listener-Join Attributen.

5.2 Network Frame Replication and Elimination for Reliability (Network-FRER)

Eine Leiter-Topologie, wie sie in [Abbildung 8](#) dargestellt ist, kann Verfügbarkeit auch dann gewährleisten, wenn im Netz mehrere Link Fehler auftreten. Dies Kapitel beschreibt den Ablauf zur Konfiguration von Network-FRER in Bridges auf der Basis eines verteilten Protokolls zur Stream Reservierung.

In einem Netzwerk, das Network-FRER unterstützt, ist es Aufgabe der Bridges, Frame Replikation und Duplikat Elimination zu unterstützen. Für Network-FRER ist wie bei E2E FRER ebenfalls eine entsprechende VLAN Konfiguration erforderlich.

Senden bzw. empfangen Endgeräte einen Stream der im Netzwerk als Compound Stream übertragen werden soll, so muss den Endgeräten bekannt sein, welche VID/VIDs für die Stream Reservierung in der Control-Plane und welche VID/VIDs zum Senden bzw. Empfangen der Streams in der Data-Plane zu verwenden sind.

In einem Netzwerk, das Network-FRER unterstützt, müssen dem Reservierungsprotokoll die konfigurierten VIDs, die von Endgeräten verwendet werden, sowie die VIDs zur Adressierung der MRTs im Netzwerk bekannt sein. Zusätzlich braucht das Reservierungsprotokoll Wissen über die VID/VIDs, die zur Übertragung von Streams (Data-Plane) im Netzwerk vorgesehen ist/sind.

Wie aus [Abbildung 6](#) für Network-FRER ersichtlich, wird in diesem Abschnitt davon ausgegangen, dass Endgeräte keinen Compound Stream, sondern einen Stream in ein Netzwerk registrieren.

Der Talker eines Endgerätes registriert sich und seinen Stream im Netzwerk durch das Senden eines Talker-Advertise Attributes, das die VID enthält, die für Endgeräte festgelegt worden ist.

Die Talker-Bridge, die ein Talker-Advertise Attribut von einem Endgerät empfängt, registriert bei sich das Attribut, repliziert es, weist den replizierten Talker-Advertise Attributen die entsprechenden VIDs zu, die zur Adressierung der entsprechenden MRTs festgelegt worden sind und propagiert dieses über die entsprechenden Ports, die der aktiven Topologie für die jeweilige VID zugeordnet sind, weiter.

Jede weitere Bridge, die ein Talker-Advertise empfängt, registriert bei sich das Attribut, repliziert das Talker-Attribut, weist den replizierten Talker-Attributen die entsprechenden VIDs zu und propagiert diese über die entsprechenden Ports, die der aktiven Topologie für die jeweilige VID zugeordnet sind, weiter.

Eine Listener-Bridge, die ein Talker-Advertise Attribut empfängt, registriert bei sich das Attribut, weist dem Talker Advertise Attribut die im Netzwerk festgelegte Endgeräte VID zu und propagiert es über ihre Edge-Ports zu Endgeräten weiter.

Abb. 11. Network-FRER Talker-Advertise Attribut Propagierung

Abbildung 11 zeigt den Ablauf in einem Netzwerk, das Network-FRER unterstützt, wie ein Talker-Advertise Attribut vom Endgerät für einen „Compound Stream“ im Netzwerk entsprechend der VID über zwei maximal disjunkte Bäume bis zu den Endgeräten propagiert wird.

Der Listener eines Endgerätes, registriert sich und den Empfang des Streams im Netzwerk durch das Senden eines Listener-Join Attributes mit der VID, die für Endgeräte festgelegt worden ist.

Eine Listener-Bridge, die ein Listener-Join Attribut von einem Endgerät empfängt, registriert bei sich das Attribut, repliziert es, weist den replizierten Listener-Join Attributen die entsprechenden VIDs zu, die zur Adressierung der entsprechenden MRTs festgelegt wurden und propagiert diese über die entsprechenden Empfangsports der Talker-Advertise Attribute zurück in Richtung Talker.

Jede weitere Bridge, die ein Listener-Join Attribut empfängt, registriert bei sich das Attribut, repliziert es, weist den replizierten Listener-Join Attributen die entsprechenden VIDs zu und propagiert die Listener-Join Attribute über die entsprechenden Empfangsports der Talker-Advertise Attribute zurück in Richtung Talker.

Eine Talker-Bridge, die ein Listener-Join Attribut empfängt, registriert bei sich das Attribut, weist dem Listener-Join Attribut die entsprechende Endgeräte VID zu und propagiert es über den Edge-Port zum Endgerät mit dem Talker weiter.

Die FRER Duplikate Filterung für die Data-Plane wird am Empfangsport des Listener-Join Attributes für einen Stream konfiguriert, sobald das Listener-Join Attribut über mehr als einen Port (mit unterschiedlichen VIDs) weitergeleitet wird.

Der in diesem Kapitel beschriebene Ablauf zur Konfiguration von Network-FRER in Bridges auf Basis eines verteilten Protokolls beweist, dass sich die Grundprinzipien von FRER auf Stream Reservation mit Attribut Replikation und Duplikate Eliminierung übertragen lassen, um hohe Verfügbarkeit zu erreichen.

Abb. 12. Network-FRER Listener-Join Attribut Propagierung

Abbildung 12 zeigt in einem Netzwerk, das Network-FRER unterstützt, den Ablauf wie ein Listener-Join Attribut vom Endgerät eines Listeners für einen „Compound Stream“ im Netzwerk entsprechend der enthaltenen VIDs über zwei maximal disjunkte Bäume bis zum Endgerät des Talkers propagiert wird.

Mit Network-FRER lässt sich mit der in Abbildung 8 dargestellten Leiter-Topologie sowohl die Verfügbarkeit von Streams auf der Data-Plane als auch die Robustheit der Reservierung in der Control-Plane erhöhen. Der in diesem Kapitel beschriebene Ablauf beweist, dass sich die Einrichtung von FRER-Funktionen in Bridges wie „Compound Stream Identification“, „Frame Replication“ und „Duplicate Elimination“ auf Basis eines verteilten Protokolls zur Stream Reservierung einfach umsetzen lässt.

Abbildung 13 zeigt typische industrielle Netzwerke mit redundant gekoppelten Ringen. Für solche Ring-Topologien kann auf eine Erfassung der Topologie und Pfadberechnung (beides ist Grundvoraussetzung für MRT) verzichtet werden. Ein Protokoll

zur Stream Reservierung für das Einrichten von „Compound Streams“ ist in derartigen Netzwerken ausreichend.

Abb. 13. Network-FRER für redundant gekoppelte Ringe

6 Fazit

Aus Sicht der Editoren lassen sich mit einem Konzept basierend auf Stream Reservierung auf der Control-Plane einfache deterministische Kommunikationssysteme entwickeln, die die Anforderungen von Industrie 4.0 an industrielle Netzwerke für Dynamik und Robustheit erfüllen. SRP, im IEEE Std 802.1Qat-2010 spezifiziert, bietet beste Voraussetzungen, allerdings sind Erweiterungen wie z.B. für Redundanz und für die Unterstützung der neuen Shaping Mechanismen, die im Rahmen von TSN für Streams entwickelt wurden bzw. noch werden, notwendig. Aus diesem Grund hat die IEEE802.1 TSN Task Group für die 2. Generation des Stream Reservierung Protokolls in der IEEE 802.1 das Projekt Resource Allocation Protocol (RAP, IEEE P802.1Qdd) gestartet.

Literatur

- [1] IEEE Std. 802.1Q-2018 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Bridges and Bridged Networks
- [2] IEEE Std. 802.1Q-2014 clause 35 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Stream Reservation Protocol (SRP)
- [3] IEEE Std. 802.1Qav-2009 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams
- [4] IEEE Std. 802.1Qbv-2015 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic
- [5] IEEE Std. 802.1Qch-2017 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Cyclic Queuing and Forwarding

- [6] IEEE Std. 802.1Qcc-2018 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements
- [7] IEEE P802.1Qcr – IEEE Draft for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Asynchronous Traffic Shaping
- [8] IEC Std. 62439-2 MRP – International Electrotechnical Commission (IEC) Standard for Industrial Communication Networks – Media Redundancy Protocol
- [9] IEC Std. 62439-3 PRP/HSR – International Electrotechnical Commission (IEC) Standard for Industrial Communication Networks – Parallel Redundancy Protocol and High-availability Seamless Redundancy
- [10] IEEE Std. 802.1CB-2017 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER)
- [11] IEEE Std. 802.1Qca-2015 – IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Amendment: Bridges and Bridged Networks
- [12] IEEE P802.1CS – IEEE Draft for Local and Metropolitan Area Networks – Link-local Registration Protocol (LRP)
- [13] Chen, F., et. al: Resource Allocation Protocol (RAP, IEEE P802.1Qdd) based on LRP for Distributed Configuration of Time-Sensitive Streams – IEEE 802.1 Public Docs, 2018.
- [14] LNI 4.0 Testbed TSN (<http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2018/li-aision-LNI40-Testbed-TSN-0918-v00.pdf>)

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.