

Mit Highspeed auf das Feld – Ethernet auf Landmaschinen

Frank Nordemann¹, Anas Bin Muslim¹ und Ralf Tönjes¹

Abstract:

Auf vielen Landmaschinen wird der CAN-Bus zur Übertragung von Daten zwischen Sensoren, Aktoren und Steuergeräten genutzt. Anwendungen wie Rückfahrkameras und Bird-View-Anzeigen erfordern in der Regel zusätzliche, breitbandige Kommunikationskanäle. Dieser Beitrag untersucht, inwieweit ein gemeinschaftliches Kommunikationsmedium auf Basis von Ethernet zur Realisierung aktueller und zukünftiger Anwendungen auf Landmaschinen genutzt werden kann. Zusätzlich wird der Einsatz aktueller Technologien wie Audio/Video Bridging, Time-Sensitive Networking und Wifi auf einem Landmaschinengespann untersucht und bewertet.

Keywords: Landmaschinenkommunikation, Ethernet, IEEE 802.1Q, AVB/TSN, Wifi

1 Motivation und Problemstellung

Die Menge der auf modernen Landmaschinen zu übertragenden Daten nimmt kontinuierlich zu. Die Nutzung von digitalen Kameras für Ansichten von Rückwärtsfahren, Bird-View-Anzeigen und für Prozessbeobachtungen verlangt nach hohen Bandbreiten und geringen Latenzzeiten. Gleichzeitig soll der weitere Datenverkehr, insbesondere zeitkritische Sicherheits-, Fehler- und Sensordaten, nicht durch die Videodaten behindert werden. Landmaschinen verfügen in der Regel über ein auf dem CAN-Bus nach SAE J1939 [SA20] basierendes Kommunikationsnetz, wie es bei vielen Maschinenbussen der Hersteller und beim ISOBUS [IS07] der Fall ist. Die dadurch ermöglichte Datenrate ist in der Regel auf 250 kbps bei einer Leitungslänge von 40 m limitiert. Weder die Datenrate noch die Leitungslänge reichen für moderne Anwendungen aus, weshalb oftmals mehrere CAN-Busse und zusätzliche Übertragungsmedien für Videodaten installiert werden.

Die Nutzung von Ethernet ist in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen erfolgreich erprobt. Auch die Industrie greift in Fabriken und deren Maschinen auf Ethernet zurück. Da insbesondere für zeitkritische Funktionen wie ein Notaus einer Maschine deterministische Übertragungszeiten von hoher Bedeutung sind, werden oftmals Industrial-Ethernet-Varianten verwendet, die den fehlenden Determinismus über zeitschlitzbasierte Verfahren umsetzen. Allerdings ist eine Landmaschine wie ein Traktorgespann nicht mit Industriemaschinen und auch nicht mit Automobilen zu vergleichen: Bei Landmaschinen werden gewöhnlich Maschinen verschiedener Hersteller je nach Anwendungsfall dynamisch gekoppelt. Bei den Industrial-Ethernet-Varianten ist es notwendig, den auftreten-

¹ Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, {f.nordemann; a.bin-muslim; r.toenjes}@hs-osnabrueck.de

den Datenverkehr vorab über Werkzeuge zu planen und die Konfiguration auf die beteiligten Komponenten zu transferieren. Beides ist aufgrund der Dynamik und Heterogenität im Landmaschinenbereich nicht möglich.

Basierend auf dem zweijährigen Forschungsprojekt NeGIS wird in diesem Beitrag untersucht, ob durch die Nutzung der weit verbreiteten Fast-Ethernet-Technologie [FE95] die Kommunikationsanforderungen moderner Landmaschinen und deren Anwendungen erfüllt werden können. Weiterhin wird untersucht, welche Möglichkeiten sich durch die Integration neuartiger Technologien wie Audio/Video-Bridging (AVB, [AV20]) und Time-Sensitive-Networking (TSN, [TS20]) ergeben.

2 Kommunikationssimulation eines Traktorgespans

Die Grundlage der Untersuchungen ist ein Traktorgespann mit insgesamt drei Anbaugeräten. Auf dem Gespann sind Kameras, Sensoren und Bediengeräte an unterschiedlichen Positionen untergebracht (siehe Abb. 1). Als Simulationssoftware wird ein erweitertes OMNeT++ genutzt, Übertragungsmedium ist ein Fast-Ethernet-Netzwerk mit 100 Mbps.

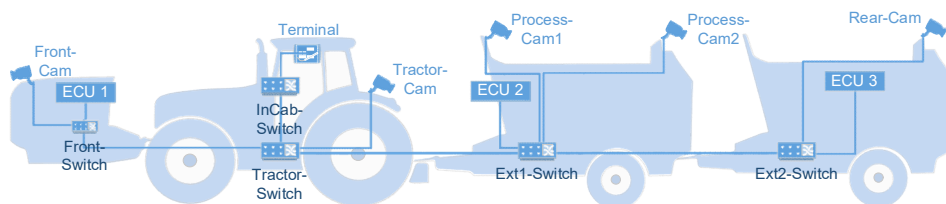


Abb. 1: Simulationsszenario bestehend aus einem Traktorgespann mit drei Anbaugeräten

Die Netzlast setzt sich aus Daten verschiedener Anwendungskategorien zusammen: Auf dem Maschinengespann befinden sich fünf Kameras zur Unterstützung von Bird-View-Anzeigen, Rückwärtsfahren und zur Prozessbeobachtung. Bei 15 Mbps pro Kamera entsteht ein gesamter Videoverkehr in Summe von 75 Mbps. Weiterhin befinden sich auf den Anbaugeräten insgesamt drei Electronic Control Units (ECU). Die ECU versenden zum einen Safety-Nachrichten (Paketgröße 42 Byte), welche beispielsweise Notaus-Nachrichten repräsentieren. Durch den kontinuierlichen Versand mit 56 kbps kann deren Latenz und Verlustrate identifiziert werden. Zum anderen generieren die ECU Hintergrunddatenverkehr, der zum Beispiel Prozesszustände, Sensor- oder Logdaten repräsentiert. Diese Nachrichten füllen mit einer Größe von 1500 Byte ein gesamtes Ethernet-Paket und werden zur Steigerung der Netzlast genutzt. Sie können nach IEEE 802.1Q [VB98] in Prioritäten unterteilt werden oder zusammen als Best-Effort-Verkehr bezeichnet werden. Als Scheduling-Mechanismus wird Strict-Priority-Scheduling eingesetzt, bei dem eine höhere Priorität absoluten Vorrang vor einer niederwertigen Priorität hat. Das Ziel des gesamten Netzverkehrs sind Bediengeräte in der Traktorkabine. Entsprechend ist mit Überlastungen des Netzwerkes im Bereich des Traktors zu rechnen.

3 Ergebnisse der Kommunikationssimulationen

Nachfolgend werden die Latenzzeiten und Paketverluste dreier unterschiedlicher Konfigurationen des Simulationsszenarios dargestellt.

3.1 Ethernet mit Prioritätsklassen

Ethernet mit Prioritäten nach IEEE 801.Q ist Grundlage der ersten Simulation. Dabei wird der Netzverkehr überwiegend durch die drei ECU generiert und in sechs Prioritätsklassen eingeteilt (Prio0 bis Prio5). Zusätzlich werden die Prioritätsklassen sechs und sieben genutzt, um Videodaten und Safety-Nachrichten zu versenden. Abb. 2 stellt die Latenzen der unterschiedlichen Prioritätsklassen mit Video/Prio6 und Safety/Prio7 dar.

Deutlich erkennbar sind hierarchische Unterschiede in den Latenzen der Prioritäten. Die niedrigste Priorität Prio0 enthält die höchsten maximalen Latenzen, zugleich steigen die Latenzwerte deutlich bei einer Überlastung des Netzwerkes an, was sich versetzt auch auf die weiteren Prioritäten überträgt. Allerdings bleiben die Latenzen für Safety- (Prio7) und Videodaten (Prio6) auch bei einer deutlichen Netzüberlastung von 160 Mbps stabil in einem Bereich von 1 ms. Dies liegt neben dem eingesetzten Strict-Priority-Scheduling auch an der geringeren Datengröße von Safety- und Videopaketen im Vergleich zu den 1500 Byte großen Datenpaketen der verbleibenden Prioritäten. Der Boxplot in Abb. 3 zeigt die Verteilung der Latenzen bei einer Netzlast von 98 Mbps. Auch hier werden die hierarchischen Unterschiede zwischen den Prioritäten ersichtlich. In Verbindung mit der kumulativen Latenzverteilung in Abb. 4 wird deutlich, dass sich die Verzögerungszeiten, je nach Priorität, in einem Bereich von 0 bis 10 ms befinden. Bedeutend ist, dass ab einer Netzlast von ca. 85 Mbps mit Paketverlusten bei niedrig priorisierten Daten gerechnet werden muss (siehe Abb. 5). Abschließend ist eine Realisierung der Beispielanwendungen aus Kameraansichten, Safety- und Best-Effort-Daten in dieser Szenariokonfiguration möglich, wenn die verwendeten Prioritäten mit Bedacht gewählt werden.

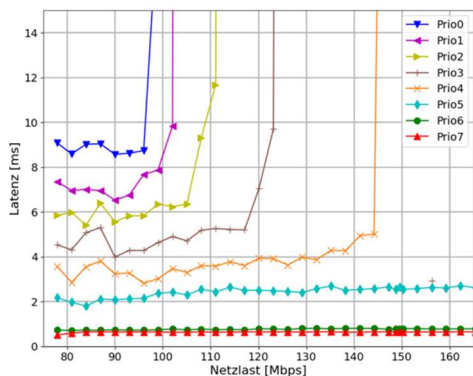


Abb. 2: Max. Latenzwerte der Prioritäten

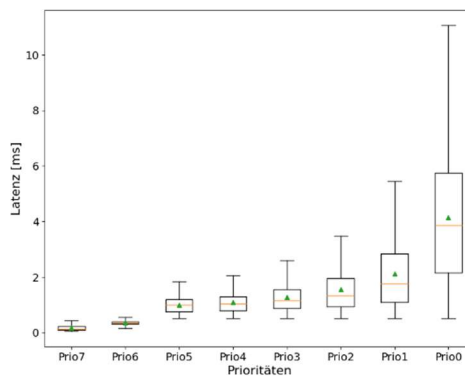


Abb. 3: Latenzwerte bei 98 Mbps Netzlast

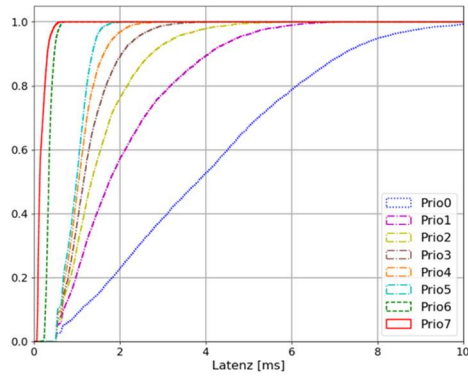


Abb. 4: Kumulative Verteilung (98 Mbps)

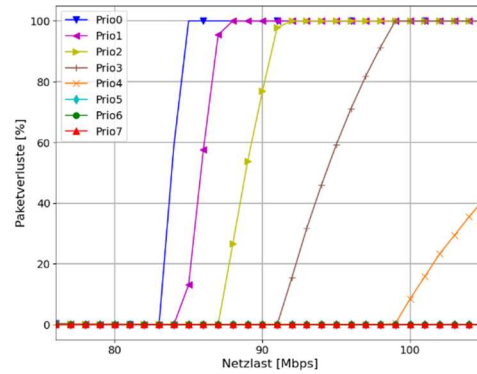


Abb. 5: Paketverluste nach Priorität

3.2 Ethernet mit Prioritätsklassen und Audio/Video Bridging (AVB)

In der zweiten Simulationskonfiguration wird mit der Nutzung von AVB ein deterministisches Übertragungsverfahren für Videodaten integriert. AVB verwendet zur Übertragung die Prioritätsklassen fünf und sechs und wird vor jeglichem anderem Datenverkehr verarbeitet. Dadurch werden auch Safety-Nachrichten, die sich auf der eigentlich höher priorisierten Stufe sieben befinden, erst im Anschluss an den AVB-Verkehr behandelt.

Die Latenzzeiten in Abb. 6 und Abb. 7 legen dar, dass für die Videodaten Verzögerungen von unter 1 ms auch bei steigender Netzlast garantiert werden können. Die kumulative Latenzverteilung in Abb. 8 veranschaulicht die zu erwartenden Latenzen bei einer Netzlast von 95 Mbps (aufgrund der Best-Effort-Konfiguration nicht 98 Mbps).

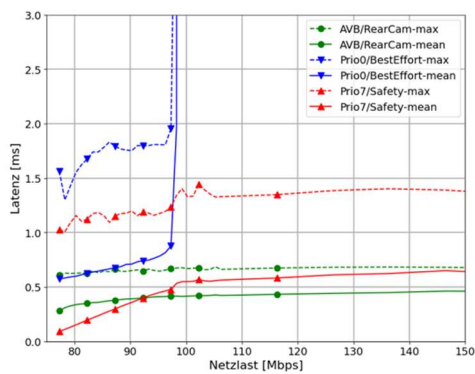


Abb. 6: Latenzwerte inkl. AVB-Videodaten

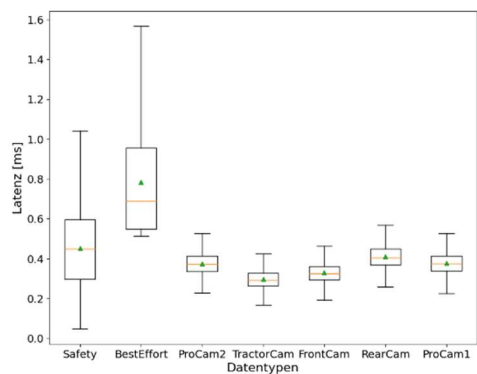


Abb. 7: Latenzwerte bei 95 Mbps Netzlast

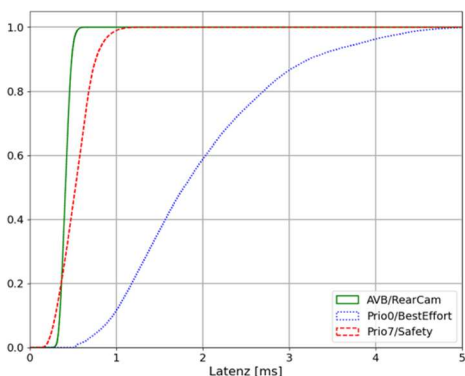


Abb. 8: Kumulative Verteilung (95 Mbps)

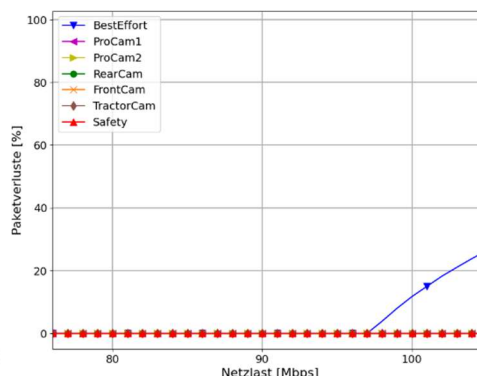


Abb. 9: Paketverluste nach Priorität

Die Latenzwerte für die Übertragung von Safety-Nachrichten liegen in geringem Rahmen über den Werten der Videodaten, weisen jedoch höhere Schwankungen auf. Einzig die als Best-Effort zusammengefassten weiteren Prioritäten lassen mit einer Überlastung des Netzwerkes deutlich steigende Latenzzeiten erkennen, bei denen gleichzeitig auch Paketverluste (siehe Abb. 9) zu erkennen sind.

3.3 Ethernet und Wifi mit Prioritätsklassen

Die Steckverbindungen zwischen Traktor und Anbaugeräten erhöhen die Leitungslänge, den Kopplungsaufwand und die physische Fehleranfälligkeit (z. B. durch Kabelbruch, Kabelstauchung und Verschmutzung). In einer dritten Simulation mit insgesamt vier Kameras werden diese Verbindungen durch Wifi nach IEEE 802.11g ersetzt, um den Einfluss einer Funktechnologie auf Latenzwerte und Paketverluste zu untersuchen.

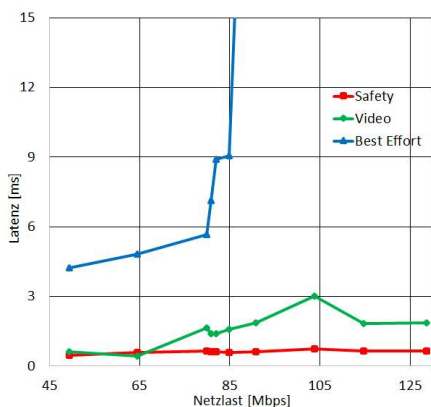


Abb. 10: Latenzwerte mit Wifi

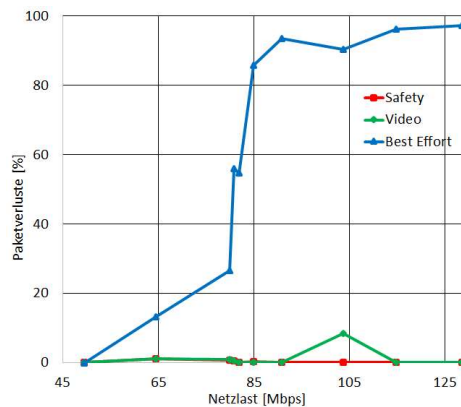


Abb. 11: Paketverluste nach Priorität mit Wifi

Ab einer Netzlast von 80 Mbps erfolgt ein Anstieg von Latenzen und Paketverlusten. Diese konzentrieren sich auf die niederpriorisierten Datenklassen, die als Best-Effort zusammengefasst sind. Die durchschnittlichen Latenzwerte in Abb. 10 liegen etwas höher als bei den kabelgebundenen Untersuchungen, befinden sich aber vor allem für Video- und Safetydaten mit 1 bis 3 ms durchgehend in einem guten Bereich. Beide Datentypen erfahren zudem nur geringe Paketverluste (siehe Abb. 11).

4 Zusammenfassung

Die mittels Simulationen durchgeführten Untersuchungen legen dar, dass bei bedachter Einteilung der zu übertragenden Daten in Prioritätsklassen die Anforderungen moderner Anwendungen auf Landmaschinen erfüllt werden können. Die notwendigen Datenraten und Latenzen können bereits durch Fast-Ethernet mit Priorisierung nach IEEE 802.1Q auch in Netzüberlastsituationen bereitgestellt werden. Mit Gigabit-Ethernet steht zudem eine Kommunikationstechnologie zur Verfügung, mit der die Möglichkeit von Netzüberlastungen für typische Anwendungsfälle deutlich reduziert werden kann.

Für die deterministische Übertragung von Videodaten kann zusätzlich AVB integriert werden, wodurch Verzögerungszeiten von unter 1 ms garantiert werden können. Basierend auf AVB kann der Nachfolgestandard TSN eine Möglichkeit darstellen, neben Videodaten auch andere Daten deterministisch (z. B. mittels Time-Aware-Shaping) zu übertragen. Dabei müssen Übertragungszeitschlitz auf einem dynamisch zusammengesetzten Maschinengespinn unterschiedlicher Hersteller ausgehandelt werden.

Werden Datentypen sinnvoll priorisiert und Überlastungen im Netz konfigurationsseitig verhindert, können die Verbindungen zwischen Traktor und Anbaugeräten drahtlos realisiert werden. Obwohl die auftretenden Latenzen oberhalb der kabelgebundenen Konfigurationen liegen, erfüllen sie die Anforderungen gängiger Anwendungen. Weitere Verbesserungen des Datendurchsatzes sind mit zukünftigen Wifi-Standards zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- [FE95] IEEE Std. 802.3u-1995, Fast-Ethernet, IEEE, 1995.
- [VB98] IEEE Std. 802.1Q-1998, Virtual Bridged Local Area Networks, IEEE, 1998.
- [AV20] IEEE 802.1BA, Audio/Video Bridging (AVB) Systems, Task Group, <http://www.ieee802.org/1/pages/802.1ba.html>, Stand: 13.10.2020.
- [TS20] IEEE Time-Sensitive Networking, Task Group, <http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>, Stand: 13.10.2020.
- [IS07] ISO 11783 Part 1-14, Tractors and machinery for agriculture and forestry - Serial control and communications data network, Beuth Verlag, 2007.
- [SA20] SAE J1939 Standards Collection, <https://www.sae.org/standardsdev/groundvehicle/j1939a.htm>, Stand: 13.10.2020.