

ICT19-045 - Fast and Quantitative What-if Analysis for Dependable Communication Networks (WHATIF)

Zusammenfassung

Kommunikationsnetze sind zu einer kritischen Infrastruktur unserer digitalen Gesellschaft geworden. Die zunehmende Komplexität und die strengen Zuverlässigkeitsanforderungen stehen jedoch in starkem Gegensatz zu den heutigen manuellen und fehleranfälligen Ansätzen zur Verwaltung von Netzwerken. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit besserer, skalierbarer und zuverlässiger Methoden zur Netzwerkanalyse und -konfiguration. Ziel des WHATIF Projekts war es, automatisierte Verfahren zur Verwaltung und zum Betrieb von Netzwerken zu entwickeln, um die Einhaltung von Richtlinien und die Dienstgüte auch im Falle von Ausfällen sicherzustellen. Ein wünschenswertes Ergebnis ist dabei die Minimierung von Ausfallzeiten und die Entlastung menschlicher Betreiber. Zusammenfassend adressiert WHATIF den Bedarf an (teil-)automatisierten Werkzeugen, die fehlersichere Netzwerkkonfigurationen unterstützen und korrekten sowie effizienten Netzwerkbetrieb auch unter Störungen gewährleisten.

Die Entwicklung solcher automatisierter Netzwerke ist jedoch eine Herausforderung. Erstens müssen die Lösungen rigoros sein und Korrektheitseigenschaften bieten, da Zuverlässigkeit und Leistung von Netzwerken für viele Anwendungen kritisch sind. Zweitens sollten die Lösungen in der Lage sein, schnell auf Ausfälle und Veränderungen der Anforderungen zu reagieren. Da viele Probleme der Netzwerkverifikation rechnerisch komplex sind, ist die Entwicklung effizienter automatisierter Netzwerke nicht trivial. Grundsätzlich scheint es, dass für die Durchführung einer "What-If"-Analyse eines Kommunikationsnetzwerks unter mehreren Ausfällen eine kombinatorische (d.h. exponentielle) Anzahl verschiedener Ausfallszenarien berücksichtigt werden muss.

Das WWTF-Projekt WHATIF hat innovative Techniken entwickelt und automatische, effiziente Werkzeuge zur Verbesserung der Netzwerkverifikation und -resilienz konzipiert. Diese Forschung hat kritische Herausforderungen im Bereich der Netzwerkverwaltung und -verifikation adressiert und praxisorientierte Lösungen beigetragen. Ein zentrales Ergebnis des Projekts ist AalWiNeS, ein automatisiertes Werkzeug zur Verifikation von Netzwerkeigenschaften. Es basiert auf einer neuartigen Automaten-basierten Abstraktion der Datenebene des Netzwerks und bietet sowohl formale Garantien als auch erhöhte Geschwindigkeit. AalWiNeS hat mehrere wissenschaftliche Publikationen hervorgebracht. Neben dem wissenschaftlichen Beitrag wurde unser Demonstrator von AalWiNeS mehreren Unternehmen in Österreich und im Ausland präsentiert.

Ein weiterer bedeutender Beitrag des Projekts ist R-MPLS, ein Mechanismus zum Schutz von Verbindungen in MPLS-Netzwerken, die heute von Internetdiensteanbietern weit verbreitet eingesetzt werden. R-MPLS verbessert die Netzwerkresilienz und Effizienz und wurde auf der ACM CoNEXT vorgestellt, wo es Interesse bei Branchenvertretern weckte. Zudem haben wir ein vorläufiges Patent eingereicht. Kurz gesagt, nutzt R-MPLS die Label-Stacking-Fähigkeit von MPLS-Netzwerken, um Schutzpfade für mehrere Ausfälle mit formalen Garantien zu kodieren. Die Effizienz von R-MPLS wird dadurch gefördert, dass Schutzrouten dezentral berechnet werden, wobei die rechnerischen, Speicher- und Kommunikationskosten denen standardmäßiger Lösungen ähnlich sind.

Um unsere Ansätze rigoros zu evaluieren und den Einsatz von KI/ML-Methoden in Kombination mit formalen Verfahren zu erleichtern, haben wir auch einen bedeutenden methodischen Beitrag geleistet: die Entwicklung von MPLS-Kit, einem Werkzeug zur automatisierten Erstellung realistischer MPLS-Datenebenen. MPLS-Kit unterstützt die effiziente

Generierung von MPLS-Datenebenen unter Verwendung industriennormativer Steuerungsprotokolle auf verschiedenen Netzwerktopologien. Es erleichtert das Prototyping und die Implementierung von MPLS-Protokollen sowie Fast-Reroute-Mechanismen, unterstützt Simulationen auf Paketebene und liefert Statistiken für Anwendungen wie Stau-, Latenz- und Resilienzanalysen. Die generierten Datenebenen können für die Eingabe in formale Verifikationswerkzeuge exportiert werden, um eine weitergehende Analyse zu ermöglichen.

Neben der Untersuchung und Optimierung einer bestehenden Netzwerkkonfiguration haben wir auch Methoden und Werkzeuge entwickelt, die Netzwerke dabei unterstützen, sich korrekt zu aktualisieren und weiterzuentwickeln. Zu diesem Zweck haben wir eine effiziente Methode für die Planung von Netzwerkaktualisierungen mit Hilfe von Binary Decision Diagrams (BDDs) beigetragen, die in den IEEE/ACM Transactions on Networking (der führenden Fachzeitschrift im Bereich Netzwerke) veröffentlicht wurde. Außerdem haben wir eine schnelle Lösung für die Erreichbarkeitsanalyse in Pushdown-Systemen unter Verwendung von CEGAR-Techniken entwickelt, die auf der Konferenz ATVA vorgestellt wurde. Damit leisten wir nicht nur bedeutende Beiträge zum Bereich Netzwerke, sondern auch zu renommierten Konferenzen im Bereich formale Methoden.

Insgesamt hat das WWTF-Projekt WHATIF wesentliche Beiträge zur Netzwerkverifikation und -resilienz geleistet. Die Ergebnisse des Projekts fördern das theoretische Verständnis und bieten praktische Werkzeuge und Methoden, die die Zuverlässigkeit und Effizienz von Netzwerksystemen verbessern und wichtige Anforderungen des modernen Netzwerkmanagements adressieren.

Communication networks have become a critical infrastructure of our digital society. However, the increasing complexity and stringent dependability requirements starkly contrast with today's manual and error-prone approach to operate networks, highlighting the need for better and more scalable and reliable network analysis and configuration approaches. The goal of the WHATIF project was to develop automated methods to manage and operate networks, ensuring policy compliance and quality of service even in the face of failures, with the desirable outcome of minimizing downtimes and alleviating the burden on human operators. In summary, WHATIF addresses the need for (semi-)automatic tools that can assist with fail-safe network configurations and guarantee correct and efficient network operations even under failures.

Designing such automated networks, however, is challenging. First, since the reliability and performance of networks are mission-critical for many applications, the solutions must be rigorous and provide correctness properties. Second, the solutions should be able to react quickly to failures and demand changes. Since many network verification problems are computationally hard, designing efficient automated networks is non-trivial. In principle, it seems that to conduct a what-if analysis of a communication network under multiple failures, a combinatorial (i.e., exponential) number of different failure scenarios needs to be considered.

The WWTF project WHATIF has conceived innovative techniques and developed automatic and efficient tools to enhance network verification and resilience. This research addressed critical network management and verification challenges, contributing practical solutions. A key project outcome is AalWiNeS, an automated tool for verifying network properties. It is based on a novel automata-based abstraction of the network's data plane and offers both formal guarantees and increased speed. AalWiNeS spawned multiple publications. In addition to the scientific contribution, our demonstrator of AalWiNeS has been presented to several companies in Austria and abroad.

Another major contribution from the project is R-MPLS, a link protection mechanism for MPLS networks, which are

widely deployed by Internet Service Providers today. R-MPLS enhances network resilience and efficiency and has been presented at ACM CoNEXT, attracting interest from industry stakeholders and we also filed a preliminary patent. In a nutshell, R-MPLS leverages the label-stacking capability of MPLS networks to encode multi-failure formally guaranteed protection paths. The efficiency of R-MPLS is fostered by the fact that protection routes are computed in a distributed manner while having computational, memory, and communication costs similar to those of standard solutions.

In order to rigorously evaluate our approaches as well as to facilitate AI/ML approaches in combination to formal methods, we also made a significant methodological contribution, developing MPLS-Kit, a tool for automated generating realistic MPLS data planes. MPLS-Kit supports efficiently generating MPLS data planes using industry-standard control protocols on various network topologies. It facilitates the prototyping and instantiation of MPLS protocols and Fast Reroute mechanisms, supports packet-level simulations, and provides statistics for applications such as congestion, latency, and resilience analysis. The generated data planes can be exported for input by formal verification tools for further analysis.

In addition to studying and optimizing a given network configuration, we also contributed methods and tools to support networks to update and evolve in a correct manner. To this end, we contribute an efficient method for scheduling network updates using Binary Decision Diagrams (BDDs), published in the IEEE/ACM Transactions on Networking (the leading journal in networking), and a fast solution for reachability analysis in pushdown systems using CEGAR techniques, published at ATVA, making significant contributions not only to the networking domain but also well-known formal methods conferences.

Overall, the WWTF project WHATIF has made meaningful contributions to network verification and resilience. The project's outcomes advance theoretical understanding and provide practical tools and methods that enhance the reliability and efficiency of network systems, addressing essential needs in modern network management.

Open Access Publikationen:

M. Chiesa, A. Kamisiński, J. Rak, G. Rétvári and S. Schmid, "A Survey of Fast-Recovery Mechanisms in Packet-Switched Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 1253-1301, Secondquarter 2021, [doi: 10.1109/COMST.2021.3063980](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3063980).

Schweiger, O., Foerster, K., & Schmid, S. (2021). Improving the Resilience of Fast Failover Routing: TREE (Tree Routing to Extend Edge disjoint paths). Proceedings of the Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14123>

Bankhamer, Gregor et al. "Randomized Local Fast Rerouting for Datacenter Networks with Almost Optimal Congestion." ArXiv abs/2108.02136 (2021): n. pag. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.02136>

Scherrer, Simon et al. "Enabling Novel Interconnection Agreements with Path-Aware Networking Architectures." 2021 51st Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN) (2021): 116-128. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.02346>

Henzinger, Monika et al. "On the Complexity of Weight-Dynamic Network Algorithms." 2021 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) (2021): 1-9. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.13172>

Schmid, S., Schnepf, N., Srba, J. (2021). Resilient Capacity-Aware Routing. In: Groote, J.F., Larsen, K.G. (eds) Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. TACAS 2021. Lecture Notes in Computer Science(), vol 12651. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72016-2_22

M. Chiesa, A. Kamisiński, J. Rak, G. Rétvári and S. Schmid, "A Survey of Fast-Recovery Mechanisms in Packet-Switched Networks," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 23, no. 2, pp. 1253-1301, Secondquarter 2021, doi: [10.1109/COMST.2021.3063980](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3063980).

Stefan Schmid, Morten Konggaard Schou, Jiří Srba, and Juan Vanerio. 2022. R-MPLS: recursive protection for highly dependable MPLS networks. In Proceedings of the 18th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies (CoNEXT '22). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 276–292. <https://doi.org/10.1145/3555050.3569140>

Philipp Zabka, Klaus-T. Foerster, Stefan Schmid, Christian Decker, Empirical evaluation of nodes and channels of the lightning network, Pervasive and Mobile Computing, Volume 83, 2022, 101584, ISSN 1574-1192, <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2022.101584>

Wenkai Dai, Klaus-Tycho Foerster, and Stefan Schmid. 2023. A Tight Characterization of Fast Failover Routing: Resiliency to Two Link Failures is Possible. In Proceedings of the 35th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures (SPAA '23). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 153–163. <https://doi.org/10.1145/3558481.3591080>

Kim G. Larsen, Anders Mariegaard, Stefan Schmid, Jiří Srba, AllSynth: A BDD-based approach for network update synthesis, Science of Computer Programming, Volume 230, 2023, 102992, ISSN 0167-6423, <https://doi.org/10.1016/j.scico.2023.102992>

Juan Vanerio, Lily Hügerich, and Stefan Schmid. 2024. Tero: Offloading CDN Traffic to Massively Distributed Devices. In Proceedings of the 25th International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN '24). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 186–198. <https://doi.org/10.1145/3631461.3631556>

Winkler, K., Paz, A., Galeana, H.R. et al. The Time Complexity of Consensus Under Oblivious Message Adversaries. Algorithmica 86, 1830–1861 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00453-024-01209-4>

Wissenschaftliche Disziplinen:

Telecommunications (60%) | Theoretical computer science (30%) | Machine learning (10%)

Keywords:

Communication Networks, Resilience, Algorithms, Formal Methods

Principal Investigator: Stefan Schmid
Institution: University of Vienna
Co-Principal Investigator(s): Jiri Srba (Aalborg University)

Status: Abgeschlossen (01.03.2020 - 28.02.2024)
GrantID: 10.47379/ICT19045

Weiterführende Links zu den beteiligten Personen und zum Projekt finden Sie unter
<https://wwtf.at/funding/programmes/ict/ICT19-045/>