

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio

Zur Komplexität der Synthese von Petri-Netzen

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Ronny Tredup geboren am 24. April 1983 in Wolfen

aus Rostock

Rostock, 17. Mai 2021

Zusammenfassung

Petri-Netz-Synthese für einen Netztyp τ ist die Aufgabe, für ein reguläres Verhalten, das als Transitionssystem A gegeben ist, zu entscheiden, ob es ein Petri-Netz N vom Typ τ (ein τ -Netz) gibt, das A implementiert. Je nach Grad der Genauigkeit wird N einer der folgenden drei *Implementierungen* zugeordnet: eine *Einbettung* bewahrt die Verschiedenheit der Zustände von A ; eine *Sprachsimulation* simuliert A bis auf Sprachäquivalenz und eine *Realisierung*, realisiert das durch A spezifizierte Verhalten exakt. Daraus resultieren die *klassischen* Synthese-Probleme τ -*Einbettung*, τ -*Sprachsimulation* und τ -*Realisierung*, die fragen, ob A durch ein τ -Netz entsprechend implementierbar ist.

Diese Dissertation liefert eine vollständige Charakterisierung der Komplexität ebendieser Entscheidungsprobleme für die sogenannten (*puren*) *b*-beschränkten *P/T-Netze* sowie deren *Erweiterungen um die Gruppe $\mathbb{Z}_{b+1}$* sowie von τ -*Einbettung* für die sogenannten *booleschen* Netze. Darüber hinaus wird die Komplexität von τ -*Sprachsimulation* und τ -*Realisierung* für eine erhebliche Teilmenge der booleschen Netztypen charakterisiert, die unter anderem alle bisher in der Literatur explizit diskutierten Netztypen umfasst.

Die Forderung, dass die Anzahl von Transitionen in der Umgebung jedes Platzes des implementierenden Netzes durch eine gegebene Zahl κ begrenzt ist, berücksichtigt, dass Ressourcen des Systems (Plätze) nur von wenigen Akteuren (Transitionen) abhängen sollen. In dieser Arbeit untersuchen wir für Typen der booleschen Netze und für die *P/T-Netze* die klassische und parametrisierte Komplexität der *Synthese von Netzen mit begrenzten Platz-Umgebungen*, die auf Sprachsimulation und Realisierung abzielt, wobei κ als Parameter gewählt wird.

Die Forderung, dass für jeden Platz die Anzahl der erreichbaren Markierungen des Netzes, in denen der Platz von einer Marke belegt ist, durch eine gegebene Zahl ϱ begrenzt ist, berücksichtigt, dass lokale Eigenschaften (Plätze) nur selten im Gesamtzustand des Systems (Markierung) erfüllt sein sollen. In dieser Dissertation zeigen wir für alle Implementierungen, dass die *Synthese boolescher Netze mit begrenzter Belegungszahl* fest-Parameter-berechenbar ist, wenn ϱ als Parameter gewählt wird.

Unabhängig von Netztyp und Implementierung ist nicht jedes Transitionssystem A implementierbar. Verschiedene Methoden streben an, A zum Zwecke der Implementierbarkeit möglichst geringfügig zu modifizieren: *Neubeschriftung* basiert auf der *Teilung von Ereignissen*, wobei ursprünglich mit demselben Ereignis beschriftete Kanten nun mit aus der Teilung entstandenen Ereignissen neu beschriftet werden; die resultierende Anzahl von Ereignissen des modifizierten Transitionssystems soll dabei eine gegebene Zahl κ nicht übersteigen. *Kanten-* und *Ereignis-* sowie *Zustandslöschung* fragen für A und eine Zahl κ , ob A durch das Löschen von höchstens κ Kanten, Ereignissen oder Zuständen, je nachdem, zu einem implementierbaren Transitionssystem modifiziert werden kann.

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine vollständige Charakterisierung der Komplexität von *Neubeschriftung*, *Kantenlöschung*, *Ereignislöschung* und *Zustandslöschung* für jede der Implementierungen *Einbettung*, *Sprachsimulation* und *Realisierung*, die auf (pure) *P/T-Netze* abzielen.

Abstract

Petri net synthesis for a *type of nets* τ is the task of deciding, for a regular behavior, which is given as a transition system A , whether there exists a Petri net N of type τ (a τ -net) that implements A . Depending on the degree of accuracy, N corresponds to one of the following three *implementations*: an *embedding* preserves the distinctness of states; a *language simulation* simulates A up to language equivalence; and a *realization* realizes exactly the behavior specified by A . This gives rise to the *classical* problems of synthesis τ -*embedding*, τ -*language simulation* and τ -*realization*, which ask whether A can be implemented accordingly by a τ -net.

This thesis presents a complete characterization of the complexity of these same decision problems for the so-called (*pure*) *b*-*bounded P/T-nets* as well as their *extensions by the group* $\mathbb{Z}_{b+1}$ and of τ -*embedding* for the so-called *Boolean nets*. Moreover, the complexity of τ -*language simulation* and τ -*realization* is characterized for a substantial subset of Boolean net types, which includes, among others, all net types explicitly discussed in the literature so far.

The requirement that the number of transitions in the environment of each place of the implementing net is restricted by a given number κ takes into account that resources of the system (places) should depend on only a few agents (transitions): In this thesis, we study the classical and parameterized complexity of *synthesis of nets with restricted place environments*, which aims at language simulation and realization, for Boolean nets and for the P/T nets, where κ is chosen as the parameter.

The requirement that for each place the number of reachable markings of the net in which the place is occupied by a token should not exceed a given number ϱ takes into account that local properties (places) should rarely be satisfied in the global state of the system (marking): In this work, we show for all implementations that *synthesis of Boolean nets with restricted number of occupancies* is fixed parameter tractable when ϱ is chosen as the parameter.

Regardless of net type and implementation, not every transition system A is implementable. Various methods aim for modifying A as little as possible for the purpose of implementability: *relabeling* is based on *event splitting*, where edges originally labeled with the same event are now relabeled with events resulting from the splitting; the resulting number of events of the modified transition system shall not exceed a given number κ ; *edge-* and *event-* as well as *state-deletion* ask for A and a number κ whether A can be modified to an implementable transition system by deleting at most κ edges, events, or states, as the case may be.

This thesis provides a complete characterization of the complexity of *relabeling*, *edge deletion*, *event deletion*, and *state deletion* for each of the implementations embedding, language simulation, and realization, which aim for (pure) P/T-nets.

Publikationsliste

Ronny Tredup

7. Mai 2021

Jeder der folgenden Beiträge ist dem Peer-Review unterzogen worden und in jeweils internationalen

1. Fachzeitschriften [1, 2] beziehungsweise
 2. Konferenzen [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] oder
 3. Workshops [17, 18, 19, 20]
- veröffentlicht worden.

- [1] Christian Rosenke and Ronny Tredup. The complexity of synthesizing elementary net systems relative to natural parameters. *J. Comput. Syst. Sci.*, 110:37–54, 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2019.12.007>, doi:10.1016/j.jcss.2019.12.007.
- [2] Ronny Tredup. The complexity of synthesizing sf nop-equipped boolean petri nets from g-bounded inputs. *Trans. Petri Nets Other Model. Concurr.*, 15:101–125, 2021. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-63079-2_5, doi:10.1007/978-3-662-63079-2_5.
- [3] Ronny Tredup, Christian Rosenke, and Karsten Wolf. Elementary net synthesis remains np-complete even for extremely simple inputs. In Victor Khomenko and Olivier H. Roux, editors, *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency - 39th International Conference, PETRI NETS 2018, Bratislava, Slovakia, June 24-29, 2018, Proceedings*, volume 10877 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 40–59. Springer, 2018. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91268-4_3, doi:10.1007/978-3-319-91268-4_3.
- [4] Ronny Tredup and Christian Rosenke. Narrowing down the hardness barrier of synthesizing elementary net systems. In Sven Schewe and Lijun Zhang, editors, *29th International Conference on Concurrency Theory, CONCUR 2018, September 4-7, 2018, Beijing, China*, volume 118 of *LIPIcs*, pages 16:1–16:15. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2018. URL: <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.CONCUR.2018.16>, doi:10.4230/LIPIcs.CONCUR.2018.16.

- [5] Ronny Tredup and Christian Rosenke. The complexity of synthesis for 43 boolean petri net types. In T. V. Gopal and Junzo Watada, editors, *Theory and Applications of Models of Computation - 15th Annual Conference, TAMC 2019, Kitakyushu, Japan, April 13-16, 2019, Proceedings*, volume 11436 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 615–634. Springer, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14812-6_38, doi:10.1007/978-3-030-14812-6\38.
- [6] Ronny Tredup. Synthesis of structurally restricted b-bounded petri nets: Complexity results. In Emmanuel Filiot, Raphaël M. Jungers, and Igor Potapov, editors, *Reachability Problems - 13th International Conference, RP 2019, Brussels, Belgium, September 11-13, 2019, Proceedings*, volume 11674 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 202–217. Springer, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30806-3_16, doi:10.1007/978-3-030-30806-3\16.
- [7] Ronny Tredup. Fixed parameter tractability and polynomial time results for the synthesis of b-bounded petri nets. In Susanna Donatelli and Stefan Haar, editors, *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency - 40th International Conference, PETRI NETS 2019, Aachen, Germany, June 23-28, 2019, Proceedings*, volume 11522 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 148–168. Springer, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21571-2_10, doi:10.1007/978-3-030-21571-2\10.
- [8] Ronny Tredup. Hardness results for the synthesis of b-bounded petri nets. In Susanna Donatelli and Stefan Haar, editors, *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency - 40th International Conference, PETRI NETS 2019, Aachen, Germany, June 23-28, 2019, Proceedings*, volume 11522 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 127–147. Springer, 2019. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21571-2_9, doi:10.1007/978-3-030-21571-2\9.
- [9] Ronny Tredup and Evgeny Erofeev. On the parameterized complexity of d -restricted boolean net synthesis. In Jianer Chen, Qilong Feng, and Jinhui Xu, editors, *Theory and Applications of Models of Computation, 16th International Conference, TAMC 2020, Changsha, China, October 18-20, 2020, Proceedings*, volume 12337 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 226–238. Springer, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59267-7_20, doi:10.1007/978-3-030-59267-7\20.
- [10] Ronny Tredup. Parameterized complexity of synthesizing b-bounded (m, n) -t-systems. In Alexander Chatzigeorgiou, Riccardo Dondi, Herodotos Herodotou, Christos A. Kapoutsis, Yannis Manolopoulos, George A. Papadopoulos, and Florian Sikora, editors, *SOFSEM 2020: Theory and Practice of Computer Science - 46th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Informatics, SOFSEM 2020, Limassol, Cyprus, January 20-24, 2020, Proceedings*, volume 12011 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 223–235. Springer, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59267-7_20, doi:10.1007/978-3-030-59267-7\20.

- [//doi.org/10.1007/978-3-030-38919-2_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38919-2_19), doi:10.1007/978-3-030-38919-2_19.
- [11] Ronny Tredup. The complexity of the label-splitting-problem for flip-flop-nets. In Sylvain Schmitz and Igor Potapov, editors, *Reachability Problems - 14th International Conference, RP 2020, Paris, France, October 19-21, 2020, Proceedings*, volume 12448 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 148–163. Springer, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-61739-4_10, doi:10.1007/978-3-030-61739-4_10.
 - [12] Ronny Tredup. Finding an optimal label-splitting to make a transition system petri net implementable: a complete complexity characterization. In Gennaro Cordasco, Luisa Gargano, and Adele A. Rescigno, editors, *Proceedings of the 21st Italian Conference on Theoretical Computer Science, Ischia, Italy, September 14-16, 2020*, volume 2756 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 131–144. CEUR-WS.org, 2020. URL: http://ceur-ws.org/Vol-2756/paper_18.pdf.
 - [13] Evgeny Erofeev and Ronny Tredup. Occupancy number restricted boolean petri net synthesis: A fixed-parameter algorithm. In Violet Ka I Pun, Volker Stolz, and Adenilso Simão, editors, *Theoretical Aspects of Computing - ICTAC 2020 - 17th International Colloquium, Macau, China, November 30 - December 4, 2020, Proceedings*, volume 12545 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 143–160. Springer, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64276-1_8, doi:10.1007/978-3-030-64276-1_8.
 - [14] Ronny Tredup and Evgeny Erofeev. The complexity of boolean state separation. In Violet Ka I Pun, Volker Stolz, and Adenilso Simão, editors, *Theoretical Aspects of Computing - ICTAC 2020 - 17th International Colloquium, Macau, China, November 30 - December 4, 2020, Proceedings*, volume 12545 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 123–142. Springer, 2020. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64276-1_7, doi:10.1007/978-3-030-64276-1_7.
 - [15] Ronny Tredup. Synthesis of petri nets with restricted place-environments: Classical and parameterized. In Didier Buchs and Josep Carmona, editors, *42nd International Conference, PETRI NETS 2021, Virtual Event, June 23-25, 2021, Proceedings*, volume 12734 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2021. doi:10.1007/978-3-030-76983-3.
 - [16] Ronny Tredup. Edge, event and state removal: the complexity of some basic techniques that make transition systems petri net implementable. In Didier Buchs and Josep Carmona, editors, *42nd International Conference, PETRI NETS 2021, Virtual Event, June 23-25, 2021, Proceedings*, volume 12734 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2021. doi:10.1007/978-3-030-76983-3.

- [17] Ronny Tredup. Tracking down the bad guys: Reset and set make feasibility for flip-flop net derivatives np-complete. In Massimo Bartoletti, Ludovic Henrio, Anastasia Mavridou, and Alceste Scalas, editors, *Proceedings 12th Interaction and Concurrency Experience, ICE 2019, Copenhagen, Denmark, 20-21 June 2019*, volume 304 of *EPTCS*, pages 20–37, 2019. URL: <https://doi.org/10.4204/EPTCS.304.2>, doi:10.4204/EPTCS.304.2.
- [18] Ronny Tredup and Christian Rosenke. On the hardness of synthesizing boolean nets. In Wil M. P. van der Aalst, Robin Bergenthum, and Josep Carmona, editors, *Proceedings of the International Workshop on Algorithms & Theories for the Analysis of Event Data 2019 Satellite event of the conferences: 40th International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency Petri Nets 2019 and 19th International Conference on Application of Concurrency to System Design ACSD 2019, ATAED@Petri Nets/ACSD 2019, Aachen, Germany, June 25, 2019*, volume 2371 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 71–86. CEUR-WS.org, 2019. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2371/ATAED2019-71-86.pdf>.
- [19] Ronny Tredup and Evgeny Erofeev. On the parameterized complexity of synthesizing boolean petri nets with restricted dependency. In Julien Lange, Anastasia Mavridou, Larisa Safina, and Alceste Scalas, editors, *Proceedings 13th Interaction and Concurrency Experience, ICE 2020, Online, 19 June 2020*, volume 324 of *EPTCS*, pages 78–95, 2020. URL: <https://doi.org/10.4204/EPTCS.324.7>, doi:10.4204/EPTCS.324.7.
- [20] Ronny Tredup and Evgeny Erofeev. On the complexity of synthesis of nop-free boolean petri nets. In Wil M. P. van der Aalst, Robin Bergenthum, and Josep Carmona, editors, *Proceedings of the International Workshop on Algorithms & Theories for the Analysis of Event Data 2020 Satellite event of the 41st International Conference on Application and Theory of Petri Nets and Concurrency Petri Nets 2020, virtual workshop, June 24, 2020*, volume 2625 of *CEUR Workshop Proceedings*, pages 66–84. CEUR-WS.org, 2020. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2625/paper-05.pdf>.