

# 1 Definitionen

Stand: 3. August 2017

Das Definitions-Kapitel wurde auf Grundlage von [BV15b] und [Sch16] zusammengestellt und teilweise von [BFLV16] beeinflusst.

**Definition 1.1 (*Modal Error-I/O-Transitionssystem*).** Ein Modal Error-I/O-Transitionssystem (MEIO) ist ein Tupel  $(P, I, O, \longrightarrow, \dashrightarrow, p_0, E)$  mit:

- $P$ : Menge der Zustände,
- $p_0 \in P$ : Startzustand,
- $I, O$ : disjunkte Mengen der (sichtbaren) Input- und Output-Aktionen,
- $\longrightarrow \subseteq P \times \Sigma_\tau \times P$ : must-Transitions-Relation,
- $\dashrightarrow \subseteq P \times \Sigma_\tau \times P$ : may-Transitions-Relation,
- $E \subseteq P$ : Menge der Fehler-Zustände.

Es wird vorausgesetzt, dass  $\longrightarrow \subseteq \dashrightarrow$  (syntaktische Konsistenz) gilt.

Das Alphabet bzw. die Aktionsmenge eines MEIO ist  $\Sigma = I \cup O$ . Die interne Aktion  $\tau$  ist nicht in  $\Sigma$  enthalten. Jedoch wird  $\Sigma_\tau := \Sigma \cup \{\tau\}$  definiert. Die Signatur eines MEIOs entspricht  $\text{Sig}(P) = (I, O)$ .

Falls  $\longrightarrow = \dashrightarrow$  gilt, wird  $P$  auch Implementierung genannt.

Implementierungen entsprechen den z.B. in [Sch16] behandelten EIOs.

Must-Transitions sind Transitions, die von einer Verfeinerung implementiert werden müssen. Die may-Transitions sind hingegen die zulässigen Transitions für eine Verfeinerung. Alle nicht vorhandenen Transitions dürfen auch in keiner Verfeinerung einer Spezifikation in MEIO-Form auftauchen.

MEIOs werden in dieser Arbeit durch ihre Zustandsmenge (z.B.  $P$ ) identifiziert und falls notwendig werden damit auch die Komponenten indiziert (z.B.  $I_P$  anstatt  $I$ ). Falls das MEIO selbst bereits einen Index hat (z.B.  $P_1$ ) kann an der Komponente die Zustandsmenge als Index wegfallen und nur noch der Index des gesamten Transitionssystems verwendet werden (z.B.  $I_1$  anstatt  $I_{P_1}$ ). Zusätzlich stehen  $i, o, a, \omega$  und  $\alpha$  für Buchstaben aus den Alphabeten  $I, O, \Sigma, O \cup \{\tau\}$  und  $\Sigma_\tau$ .

Es wird die Notation  $p \xrightarrow{\alpha} p'$  für  $(p, \alpha, p') \in \dashrightarrow$  und  $p \xrightarrow{\alpha}$  für  $\exists p' : (p, \alpha, p') \in \dashrightarrow$  verwendet. Dies kann entsprechend auf Buchstaben-Sequenzen  $w \in \Sigma_\tau^*$  erweitert werden:

## 1 Definitionen

für  $p \xrightarrow{w} p'$  ( $p \xrightarrow{w}$ ) steht für die Existenz eines Laufes  $p \xrightarrow{\alpha_1} p_1 \xrightarrow{\alpha_2} \dots p_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n} p'$  ( $p \xrightarrow{\alpha_1} p_1 \xrightarrow{\alpha_2} \dots p_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n}$ ) mit  $w = \alpha_1 \dots \alpha_n$ .

Desweiteren soll  $w|_B$  die Aktions-Sequenz bezeichnen, die man erhält, wenn man aus  $w$  alle Aktionen löscht, die nicht in  $B \subseteq \Sigma$  enthalten sind.  $\hat{w}$  steht für  $w|_\Sigma$ . Es wird  $p \xRightarrow{w} p'$  für ein  $w \in \Sigma^*$  geschrieben, falls  $\exists w' \in \Sigma_\tau^* : \hat{w}' = w \wedge p \xrightarrow{w'} p'$ , und  $p \xRightarrow{w}$ , falls  $p \xRightarrow{w} p'$  für ein beliebiges  $p'$  gilt. Falls  $p_0 \xRightarrow{w} p$  gilt, dann wird  $w$  *Trace* genannt und  $p$  ist ein *erreichbarer Zustand*.

Analog zu  $\xrightarrow{\quad}$  und  $\xRightarrow{\quad}$  werden  $\longrightarrow$  und  $\Longrightarrow$  für die entsprechenden Relationen der must-Transition verwendet.

Outputs und die interne Aktion werden *lokale Aktionen* genannt, da sie lokal vom ausführenden MEIO kontrolliert sind.

Um eine Erleichterung der Notation zu erhalten, soll gelten, dass  $p \not\xrightarrow{a}$  und  $p \not\xrightarrow{a}$  für  $\neg \exists p' : p \xrightarrow{a} p'$  und  $\neg \exists p' : p \xrightarrow{a} p'$  stehen soll.  $p \xrightarrow{a} \xRightarrow{\varepsilon} p'$  wird geschrieben, wenn  $p''$  existiert, so dass  $p \xrightarrow{a} p'' \xRightarrow{\varepsilon} p'$  gilt. Diese Transition wird auch als *schwach-nachlaufende must-Transition* bezeichnet. Entsprechend steht  $\xrightarrow{a} \xRightarrow{\varepsilon}$  für die *schwach-nachlaufende may-Transition*.

In Graphiken wird eine Aktion  $a$  als  $a?$  notiert, falls  $a \in I$  und  $a!$ , falls  $a \in O$ . Must-Transitionen (may-Transitionen) werden als durchgezogener Pfeil gezeichnet (gestrichelter Pfeil). Entsprechend der syntaktischen Konsistenz repräsentiert jede gezeichnete must-Transition auch gleichzeitig die zugrundeliegende may-Transitionen.

**Definition 1.2 (Parallelkomposition).** Zwei MEIOs  $P_1 = (P_1, I_1, O_1, \longrightarrow_1, \xrightarrow{\quad}_1, \xRightarrow{\quad}_1, p_{01}, E_1)$  und  $P_2 = (P_2, I_2, O_2, \longrightarrow_2, \xrightarrow{\quad}_2, \xRightarrow{\quad}_2, p_{02}, E_2)$  sind komponierbar, falls  $O_1 \cap O_2 = \emptyset$ . Für solche MEIOs ist die Parallelkomposition  $P_{12} := P_1 \parallel P_2 = ((P_1 \times P_2), I, O, \longrightarrow_{12}, \xrightarrow{\quad}_{12}, \xRightarrow{\quad}_{12}, (p_{01}, p_{02}), E)$  definiert mit: TODO: erzwungenen Zeilenumbrüche kontrollieren

- $I = (I_1 \cup I_2) \setminus (O_1 \cup O_2),$
- $O = (O_1 \cup O_2),$
- $\longrightarrow_{12} = \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p'_1, p'_2)) \mid p_1 \xrightarrow{\alpha}_1 p'_1, \alpha \in \Sigma_\tau \setminus \text{Synch}(P_1, P_2) \right\} \\ \cup \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p_1, p'_2)) \mid p_2 \xrightarrow{\alpha}_2 p'_2, \alpha \in \Sigma_\tau \setminus \text{Synch}(P_1, P_2) \right\} \\ \cup \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p'_1, p'_2)) \mid p_1 \xrightarrow{\alpha}_1 p'_1, p_2 \xrightarrow{\alpha}_2 p'_2, \alpha \in \text{Synch}(P_1, P_2) \right\},$
- $\xrightarrow{\quad}_{12} = \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p'_1, p'_2)) \mid p_1 \xrightarrow{\alpha}_1 p'_1, \alpha \in \Sigma_\tau \setminus \text{Synch}(P_1, P_2) \right\} \\ \cup \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p_1, p'_2)) \mid p_2 \xrightarrow{\alpha}_2 p'_2, \alpha \in \Sigma_\tau \setminus \text{Synch}(P_1, P_2) \right\} \\ \cup \left\{ ((p_1, p_2), \alpha, (p'_1, p'_2)) \mid p_1 \xrightarrow{\alpha}_1 p'_1, p_2 \xrightarrow{\alpha}_2 p'_2, \alpha \in \text{Synch}(P_1, P_2) \right\},$
- $E = (P_1 \times E_2) \cup (E_1 \times P_2)$  *geerbte Fehler*  
 $\left. \begin{array}{l} \cup \left\{ (p_1, p_2) \mid \exists a \in O_1 \cap I_2 : p_1 \xrightarrow{a}_1 \wedge p_2 \not\xrightarrow{a}_2 \right\} \\ \cup \left\{ (p_1, p_2) \mid \exists a \in I_1 \cap O_2 : p_1 \not\xrightarrow{a}_1 \wedge p_2 \xrightarrow{a}_2 \right\} \end{array} \right\}$  *neue Kommunikationsfehler.*

Dabei bezeichnet  $\text{Synch}(P_1, P_2) = (I_1 \cap O_2) \cup (O_1 \cap I_2) \cup (I_1 \cap I_2)$  die Menge der zu synchronisierenden Aktionen. Die synchronisierten Aktionen werden als Inputs, in dem Fall  $(I_1 \cap I_2)$ , bzw. Outputs, in allen anderen Fällen, der Komposition beibehalten.

$P_1$  wird Partner von  $P_2$  genannt, wenn die Parallelkomposition von  $P_1$  und  $P_2$  geschlossen ist. Eine Parallelkomposition von zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  ist geschlossen, wenn  $P_1$  und  $P_2$  duale Signaturen  $\text{Sig}(P_1) = (I, O)$  und  $\text{Sig}(P_2) = (O, I)$  haben.

Ein neuer Fehler entsteht, wenn eines der MEIOs die Möglichkeit für einen Output hat (may-Transition) und das andere MEIO den passenden Input nicht sicher stellt (keine must-Transition vorhanden). Es muss also in möglichen Implementierungen nicht wirklich zu diesem Fehler kommen, da die Output-Transition nicht zwingendermaßen implementiert werden muss und die may-Input-Transition trotzdem erlaubt sein kann. Wie bereits unter anderem in [Sch16] gesehen werden konnte, kann es durch die Synchronisation von Inputs zu neuen Fehlern kommen, da die Inputs in beiden Transitionssystemen keine lokal kontrollierten Aktionen sind. Falls jedoch nur eines der Transitionssysteme die Möglichkeit für einen Input hat, der synchronisiert wird, besteht diese Möglichkeit in der Parallelkomposition nicht mehr. Es kann also in der Kommunikation mit einem weiteren MEIO dort zu einem neuen Fehler kommen.

**Definition 1.3 (alternierende Simulation).** Eine (starke) alternierende Simulation ist eine Relation  $\mathcal{R} \subseteq P \times Q$  auf zwei MEIOs  $P$  und  $Q$ , wenn für alle  $(p, q) \in \mathcal{R}$  mit  $q \notin E_Q$  und  $\alpha \in \Sigma_\tau$  gilt:

1.  $p \notin E_P$ ,
2.  $q \xrightarrow{\alpha}_Q q'$  impliziert  $p \xrightarrow{\alpha}_P p'$  für ein  $p'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ ,
3.  $p \xrightarrow{\alpha}_P p'$  impliziert  $q \xrightarrow{\alpha}_Q q'$  für ein  $q'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ .

Die Vereinigung  $\sqsubseteq_{\text{as}}$  aller dieser Relationen wird als (starke) as-Verfeinerung(-s Relation) (auch modal Verfeinerung) bezeichnet. Es wird  $P \sqsubseteq_{\text{as}} Q$  geschrieben, falls  $p_0 \sqsubseteq_{\text{as}} q_0$  gilt.  $P \sqsubseteq_{\text{as}} Q$  steht dabei dafür, dass  $P$   $Q$  (stark) as-verfeinert oder dass  $P$  eine (starke) as-Verfeinerung von  $Q$  ist.

Für ein MEIO  $Q$  und eine Implementierung  $P$  mit  $P \sqsubseteq_{\text{as}} Q$ , ist  $P$  eine as-Implementierung von  $Q$  und es wird  $\text{as-impl}(Q)$  für die Menge aller as-Implementierungen von  $Q$  verwendet.

Da für zwei MEIOs  $P$  und  $Q$  und alle möglichen Zustands-Tupel  $(p, q)$  in einer alternierenden Simulations-Relation  $\mathcal{R}$  gelten muss, dass aus  $q \notin E_Q$  folgt, dass auch  $p$  nicht in  $E_P$  enthalten ist, gilt auch die Implikation  $p \in E_P \Rightarrow q \in E_Q$ .

**Definition 1.4 (schwache alternierende Simulation).** Eine schwache alternierende Simulation ist eine Relation  $\mathcal{R} \subseteq P \times Q$  auf zwei MEIOs  $P$  und  $Q$ , wenn für alle  $(p, q) \in \mathcal{R}$  mit  $q \notin E_Q$  und  $i \in I$  und  $\omega \in O \cup \{\tau\}$  gilt:

1.  $p \notin E_P$ ,
2.  $q \xrightarrow{i}_Q q'$  impliziert  $p \xrightarrow{i}_P \xRightarrow{\varepsilon}_P p'$  für ein  $p'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ ,

3.  $q \xrightarrow{\omega}_Q q'$  impliziert  $p \xRightarrow{\hat{\omega}}_P p'$  für ein  $p'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ ,
4.  $p \xrightarrow{i}_P p'$  impliziert  $q \xrightarrow{i}_Q \xRightarrow{\varepsilon}_Q q'$  für ein  $q'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ ,
5.  $p \xrightarrow{\omega}_P p'$  impliziert  $q \xRightarrow{\hat{\omega}}_Q q'$  für ein  $q'$  mit  $p' \mathcal{R} q'$ .

Analog zur starken alternierenden Simulation, wird hier  $\sqsubseteq_{w-as}$  als Relationssymbol verwendet und man kann auch entsprechend schwache as-Verfeinerungen betrachten.

Ebenso kann  $\sqsubseteq_{w-as}$  für ein MEIO  $Q$  und eine Implementierung  $P$  definiert werden mit  $P \sqsubseteq_{w-as} Q$ , ist  $P$  eine w-as-Implementierung von  $Q$  und es wird  $w-as-impl(Q)$  für die Menge aller w-as-Implementierungen von  $Q$  verwendet.

Die schwache Simulation erlaubt interne Aktionen beim MEIO, das die entsprechende Aktion matchen muss. Jedoch ist es zwingen notwendig, dass ein Input sofort aufgeführt wird und erst dann interne Aktionen möglich sind. Da ein Input die Reaktion auf eine Aktion ist, die die Umwelt auslöst und die nicht auf das Transitionssystem warten kann. Outputs hingegen können auch verzögert werden, da die Umgebung dies dann als Inputs aufnimmt und für diese somit nicht lokal kontrolliert ist.

Auch für alle Tupel  $(p, q)$  in einer schwach alternierenden Simulations-Relation  $\mathcal{R}$  gilt  $p \in E_P \Rightarrow q \in E_Q$ .

Die Parallelkomposition von Wörtern und Mengen kann z.B. aus [BV15a] übernommen werden.

**Definition 1.5 (Parallelkomposition auf Traces).**

- Für zwei Wörter  $w_1 \in \Sigma_1$  und  $w_2 \in \Sigma_2$  ist deren Parallelkomposition definiert als:  $w_1 \parallel w_2 := \{w \in (\Sigma_1 \cup \Sigma_2)^* \mid w|_{\Sigma_1} = w_1 \wedge w|_{\Sigma_2} = w_2\}$ .
- Für zwei Mengen von Wörtern bzw. Sprachen  $W_1 \subseteq \Sigma_1^*$  und  $W_2 \subseteq \Sigma_2^*$  ist deren Parallelkomposition definiert als:  $W_1 \parallel W_2 := \bigcup \{w_1 \parallel w_2 \mid w_1 \in W_1 \wedge w_2 \in W_2\}$ .

Ebenso können die Definitionen der Funktionen `prune` und `cont` zum Abschneiden und Verlängern von Traces z.B. aus [BV15a] übernommen werden. Hierbei ist zu beachten, dass in dieser Arbeit  $\varepsilon$  das leere Wort und  $\mathfrak{P}(M)$  die Potenzmenge der Menge  $M$  bezeichnet.

**Definition 1.6 (Pruning- und Fortsetzungs-Funktion).**

- $\text{prune} : \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*, w \mapsto u$ , mit  $w = uv, u = \varepsilon \vee u \in \Sigma^* \cdot I$  und  $v \in O^*$ ,
- $\text{cont} : \Sigma^* \rightarrow \mathfrak{P}(\Sigma^*), w \mapsto \{wu \mid u \in \Sigma^*\}$ ,
- $\text{cont} : \mathfrak{P}(\Sigma^*) \rightarrow \mathfrak{P}(\Sigma^*), L \mapsto \bigcup \{\text{cont}(w) \mid w \in L\}$ .

**Definition 1.7 (Sprache).** Die Sprache eines MEIOs  $P$  ist definiert als:  $L(P) := \{w \in \Sigma^* \mid p_0 \xRightarrow{w}_P\}$ .

Somit entspricht die Sprache eines MEIOs, das eine Implementierung ist der Definition aus [Sch16] für EIOs. Jedoch muss die Sprache einer as-Verfeinerung eines MEIOs nicht mehr Teilmenge der Sprache des MEIOs sein, da Definition 1.3 beliebiges Verhalten nach einem Fehler-Zustand in dem zu verfeinernden MEIO zulässt. Falls jedoch der MEIO bereits fehler-frei ist, ist seine Sprache die Vereinigung der Sprachen all seine möglichen as-Implementierungen.

Von der Sprache einer as-Verfeinerung eines MEIOs kann man keine Rückschlüsse mehr auf die ursprüngliche Sprache ziehen, da man nicht weiß, welche Fehler-Zustände in der Verfeinerung übernommen wurden und welche als normale Zustände mit beliebigen Verhalten umgesetzt wurden.

Man hätte alternativ die Sprache eines MEIOs anders definieren können um weiterhin einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dieser und den Sprachen der as-Implementierungen zu haben, jedoch wäre dann die Äquivalenz zur EIO Sprach-Definition in [Sch16] verloren gegangen. Eine Implementierung mit Fehler-Zuständen hätte dann auch eine Sprache mit Wörtern, die sie nicht mal ausführen können muss.

## 2 allgemeine Folgerungen

**Proposition 2.1 (*Sprache und Implementierungen*).** *Für die Sprache eines MEIOs  $P$  gilt  $L(P) \subseteq \left\{ w \in \Sigma^* \mid \exists P' \in \text{as-impl}(P) : p'_0 \xRightarrow{w}_{P'} \right\} = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} L(P').$*

*Beweis.*

Sei  $P'$  die as-Implementierung von  $P$ , die alle may- und must-Transitionen von  $P$  implementiert. Die entsprechende starke as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$ , die zwischen  $P'$  und  $P$  gilt, ist die Identitäts-Relation zwischen den Zuständen der Transitionssysteme. Die Definition von  $P'$  lautet dann:

- $P' = P$ ,
- $p'_0 = p_0$ ,
- $I_{P'} = I_P$  und  $O_{P'} = O_P$ ,
- $\longrightarrow_{P'} = \dashrightarrow_{P'} = \dashrightarrow_P$ ,
- $E'_{P'} = \emptyset$ .

Für alle  $p \in P$ , die auch von nicht Fehler-Zuständen aus erreichbar sind, muss  $p\mathcal{R}p'$  wegen 1.3 3. für entsprechenden  $p'$  in  $P'$ , die durch die analogen Transitionen erreichbar sind. Diese Tupel sind bereits in der Identitäts-Relation, die als as-Verfeinerungs-Relation vorausgesetzt wurde, enthalten. Da  $P'$  alle Transitionen von  $P$  implementiert, gilt 1.3 2. bereits durch die Tupel, die durch die Identitäts-Relation in  $\mathcal{R}$  enthalten sein müssen. Der erste Punkt von 1.3 gilt, da  $E'_P$  leer ist. Für alle  $w \in L(P) = \left\{ w \in \Sigma^* \mid p_0 \xRightarrow{w}_P \right\}$  folgt nun  $w \in L(P') = \left\{ w \in \Sigma^* \mid p'_0 \xRightarrow{w}_{P'} \right\}$ , da alle Transitionen von  $P$  in  $P'$  implementiert werden.  $\square$

**Proposition 2.2 (*Sprache der Parallelkomposition*).** *Für zwei komponierbare MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  gilt:  $L_{12} := L(P_{12}) = L_1 \parallel L_2$ .*

*Beweis.* Jedes Wort, dass in  $L_{12}$  enthalten ist, hat einen einen entsprechenden Ablauf, der in  $P_{12}$  ausführbar ist. Dieser Ablauf kann auf Abläufe von  $P_1$  und  $P_2$  projiziert werden und die Projektionen sind dann in  $L_1$  und  $L_2$  enthalten.

In einer Parallelkomposition werden die Wörter der beiden MEIOs gemeinsam ausgeführt, falls es sich um synchronisierte Aktionen handelt, und verschränkt sequenziell, wenn es sich um unsynchronisierte Aktionen handelt. Somit sind alle Wörter aus  $L_1 \parallel L_2$  auch Wörter der Parallelkomposition  $L(P_{12})$ .  $\square$

**Lemma 2.3 (*w-as-Verfeinerung und Parallelkomposition*).** Für zwei komponierbar MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  gilt, falls  $P'_1$  und  $P'_2$  schwache as-Verfeinerungen von  $P_1$  bzw.  $P_2$  sind, dann ist auch  $P'_1 \parallel P'_2$  eine schwache as-Verfeinerung von  $P_1 \parallel P_2$ .

TODO: zur technischen Aussage für die Punkte 2.-5. umwandeln

*Beweis.* Es gelte  $j \in \{1, 2\}$ . Da  $P'_j$  eine schwache as-Verfeinerung von  $P_j$  ist, gibt es nach Definition 1.4 eine schwache as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}_j$ , die beschreibt, wie  $P'_j$   $P_j$  verfeinert. Die Parallelkompositionen werden auf Basis von Definition 1.2 gebildet. Die Zustände sind also Tupel der Zustände der Komponenten. In dem man aus den Zuständen, die die  $\mathcal{R}_j$  in Relation setzt auch solche Tupel zusammensetzt, kann man eine neue schwache as-Verfeinerungs-Relation für die Verfeinerung von  $P_1 \parallel P_2$  durch  $P'_1 \parallel P'_2$  erstellen. Die neue schwache as-Verfeinerungs-Relation soll  $\mathcal{R}_{12}$  heißen und wie folgt definiert sein:  $\forall p'_1, p'_2, p_1, p_2 : ((p'_1, p'_2), (p_1, p_2)) \in \mathcal{R}_{12} \Leftrightarrow (p'_1, p_1) \in \mathcal{R}_1 \wedge (p'_2, p_2) \in \mathcal{R}_2$ . Es bleibt nun zu zeigen, dass  $\mathcal{R}_{12}$  eine zulässige schwache as-Verfeinerungs-Relation nach Definition 1.4 ist. Für alle folgenden Fälle wird  $((p'_1, p'_2), (p_1, p_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  mit  $(p_1, p_2) \notin E_{12}$  vorausgesetzt.

1. Für den ersten Punkt ist zu zeigen, dass  $(p'_1, p'_2)$  kein Element von  $E_{P'_1 \parallel P'_2}$  ist. Dies folgt direkt aus der Voraussetzung, dass  $(p_1, p_2) \notin E_{P_1 \parallel P_2}$  für das Tupel  $((p'_1, p'_2), (p_1, p_2))$  aus  $\mathcal{R}_{12}$  gilt. In dem man auf das  $\mathcal{R}_{12}$  die Definition von oben anwendet, erhält man  $(p'_j, p_j) \in \mathcal{R}_j$  für beide  $j$  Werte. Die  $p_j$  dürfen beide keine Fehler-Zustände sein, da sonst auch  $(p_1, p_2)$  ein solcher wäre. Somit folgt mit Definition 1.4 1.  $p'_j \notin E_j$  für beide  $j$  Werte. Die beiden gestrichenen Zustände in Parallelkomposition können also keinen geerbten Fehler produzieren. Jedoch könnte  $(p'_1, p'_2)$  aufgrund eines nicht erzwungenen Inputs ein neuer Fehler-Zustand sein. Dafür müsste oBdA  $p'_1 \not\rightarrow_{P'_1}^a$  und  $p'_2 \not\rightarrow_{P'_2}^a$  für ein  $a$  aus  $I_1 \cap O_2$  gelten.  $\mathcal{R}_2$  erzwingt mit 1.4 5. die schwache Ausführbarkeit des Outputs  $a$  in  $P_2$ , d.h.  $p_2 \xRightarrow{a}_2$ . Mit 1.4 2. von  $\mathcal{R}_1$  folgt  $p_1 \not\rightarrow_1^a$ . Somit müsste auch  $(p_1, p_2) \in E_{12}$  gelten, was ein Widerspruch zur Voraussetzung wäre.  $(p'_1, p'_2)$  kann also weder ein geerbter noch ein neuer Fehler-Zustand in  $P'_1 \parallel P'_2$  sein und deshalb gilt  $(p'_1, p'_2) \notin E_{P'_1 \parallel P'_2}$ .

TODO: Punkt entfernen und Output, der Synchronisation nur schwach erfordert als Gegenbeispiel einfügen

2. Aus der Definition der schwachen alternierenden Simulation in 1.4 folgt, dass für diesen Punkt zu zeigen ist:  $(p_1, p_2) \xrightarrow{i}_{12} (q_1, q_2)$  impliziert  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{i}_{P'_1 \parallel P'_2} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$  für ein  $(q'_1, q'_2)$  mit  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$ . Die  $i$ -must-Transition in  $P_1 \parallel P_2$  kann entweder aus der Synchronisation von zwei must-Inputs entstanden sein oder als unsynchronisierte Aktion aus einem  $P_1$  übernommen worden sein.
  - Fall 1 ( $i \notin \text{Synch}(P_1 \parallel P_2)$ ): OBdA ist  $i$  in  $I_1$  enthalten. Es muss also in  $P_1$  die  $i$ -Transition als must-Transition von  $p_1$  ausgehen, es gilt  $p_1 \xrightarrow{i}_1 q_1$ . Mit der Relation  $\mathcal{R}_1$  und 1.4 2. folgt, dass in  $P'_1$   $i$  als schwache Transition in der Form  $p'_1 \xrightarrow{i}_{P'_1} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_1} q'_1$  ausführbar sein muss und  $q'_1 \mathcal{R}_1 q_1$  gelten muss.  $p_2 = q_2$  muss gelten, da  $i$  nicht in  $\Sigma_2$  enthalten ist. Aus der Voraussetzung

## 2 allgemeine Folgerungen

folgt  $(p'_2, p_2) = (q'_2, q_2) \in \mathcal{R}_2$ , da  $i$  wenn es kein Element der Aktionen von  $P_2$  ist auch keine Aktion der schwachen as-Verfeinerung  $P'_2$  sein kann. Mit der Definition von  $\mathcal{R}_{12}$  kann dann daraus  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  gefolgert werden. In der Parallelkomposition von  $P'_1$  und  $P'_2$  entsteht die Transitionsfolge  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{i}_{P'_1 \parallel P'_2} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$ .

- Fall 2 ( $i \in \text{Synch}(P_1 \parallel P_2)$ ): Damit  $i$  auch in  $P_1 \parallel P_2$  ein Input ist, muss  $i \in I_1 \cap I_2$  gelten. Um die Transition  $(p_1, p_2) \xrightarrow{i}_{12} (q_1, q_2)$  in der Komposition möglich zu machen, muss in beiden  $P_j$ 's  $p_j \xrightarrow{i}_j q_j$  gelten. Durch  $\mathcal{R}_j$  und die Definition 1.4 2. folgt für beide  $j$  Werte  $p'_j \xrightarrow{i}_{P'_j} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_j} q'_j$  mit  $(q'_j, q_j) \in \mathcal{R}_j$ . Daraus ergibt sich  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  mit der Definition von  $\mathcal{R}_{12}$ . Durch die Synchronisation der  $i$ -Inputs in der Komposition von  $P'_1$  und  $P'_2$  gilt  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{i}_{P'_1 \parallel P'_2} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$ .
3. Analog zu 2. kann für diesen Punkt  $(p_1, p_2) \xrightarrow{\omega}_{12} (q_1, q_2)$  impliziert  $(p'_1, p'_2) \xRightarrow{\hat{\omega}}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$  für ein  $(q'_1, q'_2)$  mit  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  gezeigt werden. Die  $\omega$  Transition in  $P_1 \parallel P_2$  ist entweder aus einem synchronisierten oder aus einem unsynchronisierten  $\omega$  entstanden.
- Fall 1 ( $\omega \notin \text{Synch}(P_1 \parallel P_2)$ ): OBdA ist  $\omega$  in  $O_1 \cup \{\tau\}$  enthalten. Um in der Komposition  $P_1 \parallel P_2$  die must-Transition zu erhalten muss bereits für die Transition in  $P_1$   $p_1 \xrightarrow{\omega}_1 q_1$  gelten. Mit 1.4 3. kann für  $\mathcal{R}_1$  gefolgert werden, dass  $p'_1 \xRightarrow{\hat{\omega}}_{P'_1} q'_1$  mit  $(q'_1, q_1) \in \mathcal{R}_1$  gilt. In der Komposition folgt dann  $(p'_1, p'_2) \xRightarrow{\hat{\omega}}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$ , da  $\omega \notin \Sigma_2$  ist und somit  $(p'_2, p_2) = (q'_2, q_2) \in \mathcal{R}_2$  gilt. Es folgt insgesamt auch noch die Zugehörigkeit des Zustands-Tupels  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2))$  zur schwachen as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}_{12}$ .
  - Fall 2 ( $\omega \in \text{Synch}(P_1 \parallel P_2)$ ): Da in der Menge  $\text{Synch}(P_1 \parallel P_2)$  nur Inputs und Outputs enthalten sein können, muss in diesem Fall  $\omega \neq \tau$  gelten. Um einen Output  $\omega$  in der Parallelkomposition von  $P_1$  und  $P_2$  zu erhalten, muss oBdA  $\omega \in I_1 \cap O_2$  gelten. Es folgt also  $p_1 \xrightarrow{\omega}_1 q_1$  mit  $\omega \in I_1$  und  $p_2 \xrightarrow{\omega}_2 q_2$  mit  $\omega \in O_2$  für die einzelnen Transitionssysteme. Mit  $\mathcal{R}_1$  und 1.4 2. folgt  $p'_1 \xrightarrow{\omega}_{P'_1} \xRightarrow{\varepsilon}_{P'_1} q'_1$  und  $q'_1 \mathcal{R}_1 q_1$ . Wenn man  $\mathcal{R}_2$  mit 1.4 3. angewendet erhält man  $p'_2 \xRightarrow{\omega}_{P'_2} q'_2$  mit  $q'_2 \mathcal{R}_2 q_2$ . Da  $\omega$  in  $P'_2$  ein Output ist, gilt  $\omega = \hat{\omega}$ . In der Parallelkomposition von  $P'_1$  und  $P'_2$  werden zuerst die internen Aktionen von  $P'_2$  ausgeführt, bis dort der Output erreicht ist, dann wird  $\omega$  synchronisiert und danach werden die internen Aktionen beider Komponenten ausgeführt, bis man bei den Zuständen  $q'_1$  und  $q'_2$  angekommen ist. Es folgt also die Transitionsfolge  $(p'_1, p'_2) \xRightarrow{\hat{\omega}}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$  und das Tupel  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2))$  in der Relation  $\mathcal{R}_{12}$ .
4.  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{i}_{P'_1 \parallel P'_2} (q'_1, q'_2)$  impliziert  $(p_1, p_2) \xrightarrow{i}_{12} \xRightarrow{\varepsilon}_{12} (q_1, q_2)$  für ein  $(q_1, q_2)$  mit  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  ist die Voraussetzung des 4. Punktes, um zu beweisen, dass  $\mathcal{R}_{12}$  eine schwache as-Verfeinerungs-Relation ist.



Die Transition  $i$  kann wiederum durch Synchronisation von zwei Transitionen entstanden sein oder durch eine Transition aus einer der beiden Komponenten mit der Voraussetzung  $i \notin \text{Synch}(P'_1 \| P'_2)$ .

- Fall 1 ( $i \notin \text{Synch}(P'_1 \| P'_2)$ ): OBdA ist  $i$  in  $I_1$  enthalten. Es muss also in  $P'_1$  eine ausgehende  $i$ -Transition von Zustand  $p'_1$  geben, so dass  $p'_1 \xrightarrow{i} q'_1$  gilt. Mit der Relation  $\mathcal{R}_1$  und 1.4 4. folgt, dass in  $P_1$   $i$  als schwache Transition in der Form  $p_1 \xrightarrow{i} q_1$  ausführbar sein muss und  $q'_1 \mathcal{R}_1 q_1$  gelten muss.  $p'_2 = q'_2$  muss gelten, da  $i$  nicht in  $\Sigma_2$  enthalten ist. Aus der Voraussetzung folgt  $(p'_2, p_2) = (q'_2, q_2) \in \mathcal{R}_2$ , da  $i$  wenn es kein Element der Aktionen von  $P'_2$  ist auch keine Aktion der Spezifikation  $P_2$  sein kann. Mit der Definition von  $\mathcal{R}_{12}$  kann dann daraus  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  gefolgert werden. In der Parallelkomposition von  $P_1$  und  $P_2$  entsteht die Transitionsfolge  $(p_1, p_2) \xrightarrow{i} (q_1, q_2)$ .
  - Fall 2 ( $i \in \text{Synch}(P'_1 \| P'_2)$ ): Damit  $i$  auch in  $P'_1 \| P'_2$  ein Input ist, muss  $i \in I_1 \cap I_2$  gelten. Um die Transition  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{i} (q'_1, q'_2)$  in der Komposition möglich zu machen, muss in beiden Transitionssystemen  $P'_j$   $p_j \xrightarrow{i} q'_j$  gelten. Durch  $\mathcal{R}_j$  und die Definition 1.4 4., die für diese Relationen gilt, folgt für beide  $j$  Werte  $p_j \xrightarrow{i} q_j$  mit  $(q'_j, q_j) \in \mathcal{R}_j$ . Es folgt  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  mit der Definition von  $\mathcal{R}_{12}$ . Durch die Synchronisation des  $i$ 's in der Komposition von  $P_1$  und  $P_2$  gilt  $(p_1, p_2) \xrightarrow{i} (q_1, q_2)$ .
5. Analog zu 3. und 4. kann für diesen Punkt  $(p'_1, p'_2) \xrightarrow{\omega} (q'_1, q'_2)$  impliziert  $(p_1, p_2) \xrightarrow{\omega} (q_1, q_2)$  für ein  $(q_1, q_2)$  mit  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  gezeigt werden. Die  $\omega$  Transition in  $P'_1 \| P'_2$  ist entweder aus einem synchronisierten oder aus einem unsynchronisierten  $\omega$  entstanden.

- Fall 1 ( $\omega \notin \text{Synch}(P'_1 \| P'_2)$ ): OBdA ist  $\omega$  in  $O_1 \cup \{\tau\}$  enthalten. Um in  $P'_1 \| P'_2$  die may-Transition zu erhalten muss bereits in  $P'_1$  die Transition  $p'_1 \xrightarrow{\omega} q'_1$  möglich gewesen sein. Mit 1.4 5. kann für  $\mathcal{R}_1$  gefolgert werden, dass  $p_1 \xrightarrow{\omega} q_1$  mit  $(q'_1, q_1) \in \mathcal{R}_1$  gilt. In der Komposition folgt dann  $(p_1, p_2) \xrightarrow{\omega} (q_1, q_2)$ , da  $\omega \notin \Sigma_2$  ist und somit  $(p'_2, p_2) = (q'_2, q_2) \in \mathcal{R}_2$  gilt. Es folgt insgesamt auch noch die Zugehörigkeit des Zustands-Tupels  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2))$  zur schwachen as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}_{12}$ .
- Fall 2 ( $\omega \in \text{Synch}(P'_1 \| P'_2)$ ): Es muss  $\omega \neq \tau$  gelten und somit muss oBdA  $\omega \in I_1 \cap O_2$  gelten. Es folgt also  $p'_1 \xrightarrow{\omega} q'_1$  mit  $\omega \in I_1$  und  $p'_2 \xrightarrow{\omega} q'_2$  mit  $\omega \in O_2$  für die einzelnen Transitionssysteme. Mit  $\mathcal{R}_1$  und 1.4 4. folgt  $p_1 \xrightarrow{\omega} q_1$  und  $q'_1 \mathcal{R}_1 q_1$ . Wenn man  $\mathcal{R}_2$  mit 1.4 5. angewendet erhält man  $p_2 \xrightarrow{\omega} q_2$  mit  $q'_2 \mathcal{R}_2 q_2$ . Da  $\omega$  in  $P_2$  ein Output ist, gilt  $\omega = \hat{\omega}$ . In der Parallelkomposition von  $P_1$  und  $P_2$  werden zuerst die internen Aktionen von  $P_2$  ausgeführt, bis dort der Output erreicht ist, dann wird  $\omega$  synchronisiert und danach werden die internen Aktionen beider Komponenten ausgeführt, bis

man bei den Zuständen  $q_1$  und  $q_2$  angekommen ist. Es folgt also die Transitionsfolge  $(p_1, p_2) \xRightarrow{\hat{\omega}}_{12} (q_1, q_2)$  und das Tupel  $((q'_1, q'_2), (q_1, q_2))$  in der Relation  $\mathcal{R}_{12}$ .

□

**Korollar 2.4 (as-Verfeinerungen und Parallelkomposition).** *Für zwei komponierbar MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  gilt, falls  $P'_1$  und  $P'_2$  as-Verfeinerungen von  $P_1$  bzw.  $P_2$  sind, dann ist auch  $P'_1 \parallel P'_2$  eine as-Verfeinerung von  $P_1 \parallel P_2$ .*

*Beweis.* Falls die Relationen  $\mathcal{R}_1$  und  $\mathcal{R}_2$  aus dem Beweis von Lemma 2.3 keine schwachen as-Verfeinerungs-Relationen sondern starke as-Verfeinerungs-Relation sind, ist auch  $\mathcal{R}_{12}$  eine starke as-Verfeinerungs-Relation zwischen  $P'_1 \parallel P'_2$  und  $P_1 \parallel P_2$ . Es ist also nur zu zeigen, wie aus den einzelnen Beweispunkten des Beweises von 2.3 folgt, dass  $\mathcal{R}_{12}$  eine starke as-Verfeinerungs-Relation ist. Es gilt hier ebenso für alle Punkte die Voraussetzung  $((p'_1, p'_2), (p_1, p_2)) \in \mathcal{R}_{12}$  mit  $(p_1, p_2) \notin E_{12}$ .

1. Dieser Punkt kann im Gegensatz zu 1. aus dem Beweis von Lemma 2.3 bewiesen werden. Dies ist möglich, da für  $p_2$  der Output  $a$  nicht nur schwach sondern direkt ausführbar ist. Es ist also zu zeigen, dass  $(p'_1, p'_2)$  kein Element von  $E_{P'_1 \parallel P'_2}$  ist.  
Dies folgt direkt aus der Voraussetzung, dass  $(p_1, p_2) \notin E_{P_1 \parallel P_2}$  für das Tupel  $((p'_1, p'_2), (p_1, p_2))$  aus  $\mathcal{R}_{12}$  gilt. In dem man auf das  $\mathcal{R}_{12}$  die Definition von oben anwendet, erhält man  $(p'_j, p_j) \in \mathcal{R}_j$  für beide  $j$  Werte. Die  $p_j$  dürfen beide keine Fehler-Zustände sein, da sonst auch  $(p_1, p_2)$  ein solcher wäre. Somit folgt mit Definition 1.3 1.  $p'_j \notin E_j$  für beide  $j$  Werte. Die beiden gestrichenen Zustände in Parallelkomposition können also keinen geerbten Fehler produzieren. Jedoch könnte  $(p'_1, p'_2)$  aufgrund eines nicht sichergestellten Inputs ein neuer Fehler-Zustand sein. Dafür müsste oBdA  $p'_1 \xrightarrow{a}_{P'_1}$  und  $p'_2 \xrightarrow{a}_{P'_2}$  für ein  $a$  aus  $I_1 \cap O_2$  gelten.  $\mathcal{R}_2$  erzwingt mit 1.3 3. die Ausführbarkeit des Outputs  $a$  in  $P_2$ , d.h.  $p_2 \xrightarrow{a}_{P_2}$ . Mit 1.3 2. von  $\mathcal{R}_1$  folgt  $p_1 \xrightarrow{a}_{P_1}$ . Somit müsste auch  $(p_1, p_2) \in E_{12}$  gelten, was ein Widerspruch zur Voraussetzung wäre.  $(p'_1, p'_2)$  kann also weder ein geerbter noch ein neuer Fehler-Zustand in  $P'_1 \parallel P'_2$  sein und deshalb gilt  $(p'_1, p'_2) \notin E_{P'_1 \parallel P'_2}$ .
2.  $\alpha$  kann sowohl Input, Output wie auch internen Aktion sein. Um diesen Punkt zu beweisen muss man 2. und 3. aus dem Beweis von Lemma 2.3 kombinieren. Da die  $\mathcal{R}_j$  für  $j \in \{1, 2\}$  jedoch die Transition in den  $P'_j$  ohne zusätzliche  $\tau$ -Transitionen fordern, entstehen in den einzelnen Komponenten keine schwachen Transitionen für die  $\alpha$ s und somit ist  $\alpha$  auch in der Parallelkomposition  $P'_1 \parallel P'_2$  eine direkte Transition ohne zusätzliche  $\tau$ s. Es folgt also das zu zeigende für diesen die starke as-Verfeinerungs-Relation für diesen Punkt.
3. Hierfür werden die Punkte 3. und 4. aus dem Beweis des Lemmas 2.3 kombiniert. Analog wie bei 2. diese Beweises fallen die zusätzlichen  $\tau$ -Transitionen durch die stärkere Forderung an  $\mathcal{R}_1$  und  $\mathcal{R}_2$  weg. Dieser Punkt gilt also ebenfalls.

TODO: Argumentation an die technische Aussage für die schwache Verfeinerung anpassen

□

**Korollar 2.5 (*as-Implementierungen und Parallelkomposition*).** Für zwei komponierbare MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  gilt:  $P'_1 \in \text{as-impl}(P_1) \wedge P'_2 \in \text{as-impl}(P_2) \Rightarrow (P'_1 \parallel P'_2) \in \text{as-impl}(P_1 \parallel P_2)$ .

*Beweis.*  $P'_1$  und  $P'_2$  sind Aufgrund der Definition 1.3 auch starke as-Verfeinerungen von  $P_1$  bzw.  $P_2$ . Somit ist die Parallelkomposition  $P'_1 \parallel P'_2$  auch eine starke as-Verfeinerung von  $P_1 \parallel P_2$ , wegen Korollar 2.4. Für Implementierungen gilt  $\longrightarrow = \dashrightarrow$ . Durch die Definition der Parallelkomposition in 1.2 können aus zwei komponierbaren Implementierungen in der Komposition keine may-Transitionen ohne zugehörige must-Transitionen entstehen. Es gilt also auch  $\longrightarrow_{P'_1 \parallel P'_2} = \dashrightarrow_{P'_1 \parallel P'_2}$  und somit ist  $P'_1 \parallel P'_2$  eine Implementierung und eine as-Verfeinerung von  $P_1 \parallel P_2$ . Dies entspricht der Definition der starken as-Implementierung, sodass  $(P'_1 \parallel P'_2) \in \text{as-impl}(P_1 \parallel P_2)$  gilt. □

Die entgegengesetzte Richtung von Korollar 2.4 gilt im allgemeinen nicht, d.h. es muss zu einer as-Verfeinerung  $P'$  einer Parallelkomposition  $P_1 \parallel P_2$  keine as-Verfeinerungen  $P'_1$  bzw.  $P'_2$  der einzelnen Komponenten  $P_1$  bzw.  $P_2$  geben, deren Parallelkomposition  $P'_1 \parallel P'_2$  der as-Verfeinerung der Parallelkomposition  $P'$  entsprechen. Die Problematik wird in Abbildung 2.1 an einem Beispiel dargestellt. In der Parallelkomposition wird die may-Transition von  $P_2$  zu zwei may-Transitionen, für die in einer as-Verfeinerung unabhängig entschieden werden kann, ob sie übernommen, implementiert oder weggelassen werden. Somit kommt es in  $P'$  zu dem Problem, dass keine as-Verfeinerung von  $P_2$  (entweder keine Transition oder die  $o'$  Transition wird als may- oder must-Transition ausgeführt) in Parallelkomposition mit der Implementierung  $P_1$   $P'$  ergeben würde.

Da jede as-Verfeinerungs-Relation auch eine schwache as-Verfeinerungs-Relation ist, folgt draus auch, dass die entgegengesetzte Richtung von Lemma 2.3 ebenfalls nicht gelten kann. Auch im Spezialfall von as-Implementierungen bzw. w-as-Implementierungen kann das Gegenbeispiel angewendet werden, da  $P'$  auch eine Implementierung von  $P_1 \parallel P_2$  ist und es auch keine passende as-Implementierung bzw. w-as-Implementierung von  $P_2$  geben kann, wenn es schon keine passende Verfeinerung gibt.

Ein neuer Fehler in einer Parallelkomposition zweier MEIOs muss in einer Implementierung (as oder w-as) dieser Parallelkomposition nicht auftauchen, auch nicht in der Parallelkomposition von Implementierungen der einzelnen Komponenten. Dies liegt daran, dass für den Input nur vorausgesetzt wird, dass keine must-Transition für die Synchronisation der Aktion vorhanden ist. Es kann trotzdem eine may-Transition für den Input geben, die auch implementiert werden kann. Falls es aber in der Parallelkomposition zweier MEIO zu einem neuen Fehler kommt, dann gibt es auch immer mindestens eine mögliche Implementierung, die diesen Fehler enthält und es gibt auch immer mindestens ein Implementierungs-Paar der Komponenten, in deren Parallelkomposition sich dieser Fehler ebenfalls zeigt.

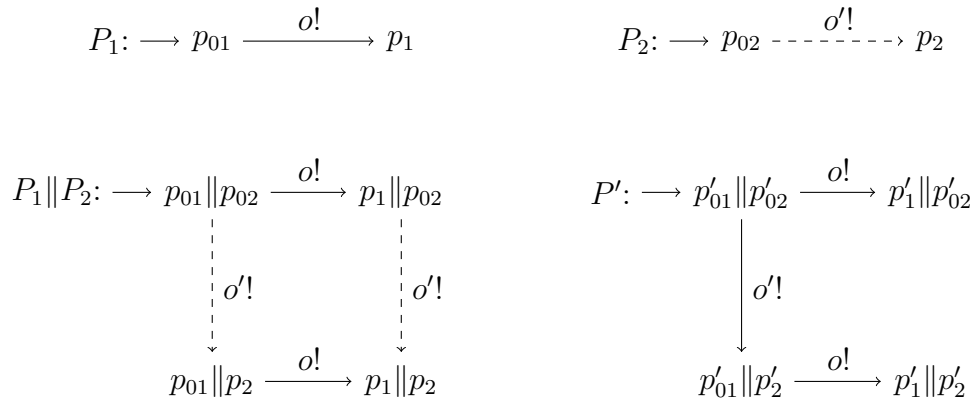


Abbildung 2.1: Gegenbeispiel für Umkehrung von Lemma 2.4

## 3 Verfeinerungen für Kommunikationsfehler-Freiheit

### 3.1 Erweiterungs-Ansatz

Dieses Kapitel versucht die Präkongruenz für Error bei EIOs aus z.B. [Sch16] auf die hier betrachten MEIOs zu erweitern.

**Definition 3.1 (fehler-freie Kommunikation).** *Ein Fehler-Zustand ist lokal erreichbar in einem MEIO  $P$ , wenn ein  $w \in O^*$  existiert mit  $p_0 \xRightarrow{w}_P p \in E$ . Zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  kommunizieren fehler-frei, wenn keine as-Implementierungen ihrer Parallelkomposition  $P_{12}$  einen Fehler-Zustände lokal erreichen kann.*

**Definition 3.2 (Kommunikationsfehler-Verfeinerungs-Basirelation).** *Für zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  mit der gleichen Signatur wird  $P_1 \sqsubseteq_E^B P_2$  geschrieben, wenn nur dann ein Fehler-Zustand in einer as-Implementierung von  $P_1$  lokal erreichbar ist, wenn es auch eine as-Implementierung von  $P_2$  gibt, in der ein Fehler-Zustand auch lokal erreichbar ist. Die Basisrelation stellt eine Verfeinerung-Relation bezüglich Kommunikationsfehler-Freiheit dar.*

$\sqsubseteq_E^C$  bezeichnet die vollständig abstrakte Präkongruenz von  $\sqsubseteq_E^B$  bezüglich  $\cdot\|\cdot$ , d.h. die größte Präkongruenz bezüglich  $\cdot\|\cdot$ , die in  $\sqsubseteq_E^B$  enthalten ist.

Für as-Implementierungen  $P_1$  und  $P_2$  entspricht  $\sqsubseteq_E^B$  der Relation  $\sqsubseteq_E^B$  aus [Sch16].

Wie z.B. in [Sch16] werden die Fehler hier Trace-basiert betrachtet.

**Definition 3.3 (Kommunikationsfehler-Traces).** *Für ein MEIO  $P$  wird definiert:*

- strikte Fehler-Traces:  $StET(P) := \{w \in \Sigma^* \mid p_0 \xRightarrow{w}_P p \in E\}$ ,
- gekürzte Fehler-Traces:  $PrET(P) := \{\text{prune}(w) \mid w \in StET(P)\}$ ,
- Input-kritische-Traces:  $MIT(P) := \{wa \in \Sigma^* \mid p_0 \xRightarrow{w}_P p \wedge a \in I \wedge p \not\xrightarrow{a}_P\}$ .

Da die Basisrelation über as-Implementierungen spricht, ist es wichtig bereits in den Trace-Mengen eine Beziehung zwischen der allgemeinen Definition für MEIOs und deren as-Implementierungen herzustellen. Die nächste Proposition stellt eine Teilmengen-Beziehung zwischen den Traces eines MEIOs und den Traces seiner as-Implementierungen dar.

**Proposition 3.4 (Kommunikationsfehler-Traces und Implementierungen).**

 Sei  $P$  ein MEIO.

1. Für die strikten Fehler-Traces von  $P$  gilt:  $StET(P) \subseteq \{w \in \Sigma^* \mid \exists P' \in \text{as-impl}(P) : p'_0 \xRightarrow{w}_{P'} p' \in E\} = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} StET(P').$  TODO: erzwungen Zeilenumbruch kontrollieren
2. Für die gekürzten Fehler-Traces von  $P$  gilt:  $PrET(P) \subseteq \{\text{prune}(w) \mid \exists P' \in \text{as-impl}(P) : w \in StET(P')\} = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} PrET(P').$  TODO: erzwungen Zeilenumbruch kontrollieren
3. Für Input-kritischen-Traces von  $P$  gilt:  $MIT(P) \subseteq \{wa \in \Sigma^* \mid \exists P' \in \text{as-impl}(P) : p'_0 \xRightarrow{w}_{P'} p' \wedge a \in I \wedge p' \not\xrightarrow{a}_{P'}\} = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} MIT(P').$  TODO: erzwungen Zeilenumbruch kontrollieren

Beweis.

1. Um die Inklusion zu zeigen wird eine Implementierung  $P'$  angegeben, die die strikten Fehler-Traces von  $P$  implementiert und zusätzlich auch noch eine passende as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  zwischen den beiden Transitionssystemen.  $P'$  implementiert wie im Beweis zu Proposition 2.1 alle Transitionen von  $P$ . Das  $P'$  wird hier jedoch im Gegensatz zu Beweis von 2.1 auch noch alle Fehler-Zustände aus  $P$  implementieren. Die entsprechende as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  ist jedoch hier ebenfalls wieder die Identitäts-Relation zwischen den Zuständen der Transitionssysteme. Die Definition von  $P'$  lautet also:

- $P' = P,$
- $p'_0 = p_0,$
- $I_{P'} = I_P$  und  $O_{P'} = O_P,$
- $\longrightarrow_{P'} = \dashrightarrow_{P'} = \dashrightarrow_P,$
- $E'_P = E_P.$

Die Tupel, die von 1.3 2. und 3. als Elemente der as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  gefordert werden, sind bereits durch die Identitäts-Relation garantiert. Wie im Beweis 2.1. Für 1.3 1. muss für jedes in der as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  enthaltene Zustands-Paar gelten, wenn der Zustand aus  $P$  kein Fehler-Zustand ist, dann ist auch der Zustand aus  $P'$  keiner, dies folgt aus der Gleichheit der Mengen  $E_P$  und  $E'_P$ . Jeder Trace aus  $StET(P)$  ist via may-Transitionen in  $P$  ausführbar und führt dort zu einem Fehler-Zustand. Der analoge Trace ist auch in  $P'$  möglich, da alle may-Transitionen aus  $P$  in  $P'$  als must-Transitionen implementiert wurden. Der dabei erreichte Zustand steht mit dem Fehler-Zustand in  $P$  in der Identitäts-Relation  $\mathcal{R}$ , die Zustände entsprechen sich also. Es gilt mit  $E'_P = E_P$ , dass auch der in  $P'$  erreichte Zustand ein Fehler-Zustand ist. Für die as-Implementierung  $P'$  von  $P$  und der Identitäts-Relation  $\mathcal{R}$  als starke as-Verfeinerungs-Relation zwischen den Transitionssystemen gilt also  $StET(P) = StET(P')$ .

2. Da der erste Punkt dieser Proposition bereits bewiesen wurde, gilt bereits, dass alle strikten Fehler-Traces von  $P$  in der Vereinigung aller strikten Fehler-Traces der as-Implementierungen von  $P$  enthalten sind. Wenn auf alle Wörter in beiden Mengen die prune-Funktion angewendet wird, gilt die Inklusion der daraus entstanden Mengen weiterhin. Dies entspricht der Behauptung des Punktes.
3. Auch für diese Inklusion wird eine starke as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  und eine Implementierung  $P'$  angegeben. Jedoch werden nicht wie bei 1. alle Transitionen von  $P$  in  $P'$  implementiert. Es wird auch für alle  $wa$  aus  $MIT(P)$  eine eigene Implementierung  $P'$  geben und nicht eine für alle. Es werden alle must-Transitionen aus  $P$  in  $P'$  implementiert und zusätzlich die may-Transitionen, die zum Ausführen von  $w$  benötigt werden, so dass das  $a$  danach in  $P$  nicht gefordert wird. Es kann aufgrund möglicher Schleifen in  $P$  auch nicht mehr die Identitäts-Relation als as-Verfeinerungs-Relation gewählt werden. Der  $w$  Trace wird entsprechend seiner Länge abgewickelt, so dass sicher gestellt wird, dass der Zustand am Ende dieses Traces wirklich ruhig ist und nicht Teil einer Schlinge in  $w$ . Für das Abwickeln werden die Zustände entsprechend ihrer Position in  $w$  durchnummeriert. Für ein  $w$ , für das  $wa \in MIT(P)$ , gilt:  $\exists w' \in \Sigma_\tau^*, \exists \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \exists p_1, p_2, \dots, p_n : \hat{w}' = w \wedge w' = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n \wedge p_0 \xrightarrow{\alpha_1} p_1 \xrightarrow{\alpha_2} \dots p_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n} p_n$ . Die starke as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  enthält in diesem Fall Tupel  $((p, j), p)$  für alle  $0 \leq j \leq n$ . Die entsprechende Definition für das  $P'$ , das  $wa$  als Input-kritischen-Trace enthalten soll lautet:

- $P' = P \times \{0, 1, \dots, n\}$ ,
- $p'_0 = (p_0, 0)$ ,
- $I'_P = I_P$  und  $O'_P = O_P$ ,
- $\xrightarrow{'}_P = \xrightarrow{-}_{P'} = \left\{ ((p, j), \alpha, (p', j+1)) \mid p \xrightarrow{-}_P p', 0 \leq j < n \right\} \cup \left\{ ((p, j), \alpha, (p', j)) \mid p \xrightarrow{\alpha}_P p', 0 \leq j \leq n \right\}$ ,
- $E'_P = \emptyset$ .

Der Ablauf von  $w$  aus  $P$  wird in  $P'$  durch  $(p_0, 0) \xrightarrow{\alpha_1} (p_1, 1) \xrightarrow{\alpha_2} \dots (p_{n-1}, n-1) \xrightarrow{\alpha_n} (p_n, n)$  simuliert.  $w$  ist also in  $P'$  ausführbar.  $a$  ist für  $(p_n, n)$  nicht ausführbar, da in  $P$  für  $p_n$   $p_n \not\xrightarrow{a}$  gilt und für die Zustände mit der Nummer  $n$  in  $P'$  nur die must-Transitionen implementiert werden. Die implementierten Transitionen in  $P'$  haben nach Definition alle zugrundeliegende may-Transitionen in  $P$  an den in Relation  $\mathcal{R}$  stehenden Zuständen. Es werden durch die zweite Menge der Transitions-Definition von  $P'$  alle must-Transitionen aus  $P$  entsprechend in  $P'$  implementiert. Da die Menge  $E'_P$  leer ist, gelten alle Bedingungen, damit  $\mathcal{R}$  eine as-Verfeinerungs-Relation zwischen  $P'$  und  $P$  ist. Mit der Begründung von oben folgt auch  $wa \in MIT(P')$ . Da für alle  $wa$  aus  $MIT(P)$  eine entsprechende Implementierung mit as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  angegeben werden kann, gilt die Inklusion.

□

**Definition 3.5 (Kommunikationsfehler-Semantik).** Sei  $P$  ein MEIO.

- Die Menge der Fehler-Traces von  $P$  ist  $ET(P) := \text{cont}(\text{PrET}(P)) \cup \text{cont}(\text{MIT}(P))$ .
- Die Fehler-geflutete Sprache von  $P$  ist  $EL(P) := L(P) \cup ET(P)$ .

Für zwei MEIOs  $P_1, P_2$  mit der gleichen Signatur wird  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  geschrieben, wenn  $ET_1 \subseteq ET_2$  und  $EL_1 \subseteq EL_2$  gilt.

Hierbei ist zu beachten, dass die Mengen  $StET$ ,  $PrET$ ,  $MIT$ ,  $ET$  und  $EL$  nur denen aus [Sch16] entsprechen, wenn  $P$  bereits eine as-Implementierung ist.

Aus den Propositionen für die Sprache und die Traces konnte für die Vereinigung der gleichen Mengen über die Implementierungen immer nur eine Inklusionsrichtung gefolgert werden, da die Definition 1.3 nach einen Fehler-Zustand in  $P$  beliebiges Verhalten ins dessen as-Implementierungen zulässt. Mit dem Einsatz der cont-Funktion zum beliebigen fortsetzen der Traces kann dies ausgeglichen werden. Somit gilt wie die nächsten Proposition behauptet für die Fehler-Traces und die Fehler-geflutete Sprache Gleichheit und nicht nur die Inklusion, die aus den Propositionen vorher bereits folgt.

**Proposition 3.6 (Kommunikationsfehler-Semantik und Implementierungen).** Sie  $P$  ein MEIO.

1. Für die Menge der Fehler-Traces von  $P$  gilt  $ET(P) = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} ET(P')$ .
2. Für die Fehler-geflutete Sprache von  $P$  gilt  $EL(P) = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} EL(P')$ .

*Beweis.*

1. „ $\subseteq$ “:

$$\begin{aligned}
 ET(P) &\stackrel{3.5}{=} \text{cont}(\text{PrET}(P)) \cup \text{cont}(\text{MIT}(P)) \\
 &\stackrel{3.4}{\subseteq} \text{cont} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} \text{PrET}(P') \right) \cup \text{cont} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} \text{MIT}(P') \right) \\
 &\stackrel{\text{cont monoton}}{=} \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} \text{cont}(\text{PrET}(P')) \cup \text{cont}(\text{MIT}(P')) \\
 &\stackrel{3.5}{=} \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} ET(P').
 \end{aligned}$$

1. „ $\supseteq$ “:

Da für  $P$   $ET(P) = \text{cont}(\text{PrET}(P)) \cup \text{cont}(\text{MIT}(P))$  gilt und für alle as-Implementierungen  $P'$  von  $P$  die analogen Gleichungen für  $ET(P')$  gelten, genügt es ein präfix-minimales  $w$  aus  $ET(P)$  für eine as-Implementierung  $P'$  von  $P$  zu betrachten. Da  $w$  präfix-minimal ist für  $P'$  ist  $w$  entweder vollständig oder bis auf den letzten Buchstaben



in  $P'$  ausführbar. Dies hängt davon ab, ob  $w \in PrET(P')$  oder  $w \in MIT(P')$  gilt. Für  $P$  muss jedoch nicht mal das Präfix von  $w$  ohne den letzten Buchstaben von  $w$  ausführbar sein.

- Fall 1 ( $w \in PrET(P')$ ): In  $P'$  existiert eine Verlängerung  $v \in O^*$  von  $w$ , so dass  $wv \in StET(P')$  gilt. Es gibt also Zustände  $p'_1, p'_2, \dots, p'_n$  in  $P'$  und ein Wort  $w'$  für das  $\hat{w}' = wv$  und  $w' = \alpha_1\alpha_2 \dots \alpha_n$  gilt. Aus diesen Bausteinen ist der strikte Fehler-Trace  $p'_0 \xrightarrow{\alpha_1}_{P'} p'_1 \xrightarrow{\alpha_2}_{P'} \dots p'_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n}_{P'} p'_n \in E_{P'}$  aufgebaut. Es kann oBdA davon ausgegangen werden, dass für alle Zustände außer  $p'_n$  gilt, dass sie keine Fehler-Zustände sind. Da  $P'$  eine as-Implementierung von  $P$  ist, muss für die Startzustände der beiden Transitionssysteme  $p'_0 \sqsubseteq_{as} p_0$  gelten. Es wird nun versucht via Induktion zu zeigen, dass man den strikten Fehler-Trace in  $P$  nachmachen kann. Es soll dafür bewiesen werden, falls  $p_j \notin E_P$  gilt und  $p'_j \sqsubseteq_{as} p_j$  bereits nachgewiesen wurde, dass auch  $p'_{j+1} \sqsubseteq_{as} p_{j+1}$  gelten muss für ein  $p_{j+1} \in P$  und  $0 \leq j < n$ . Für  $j = 0$  gilt bereits  $p'_j \sqsubseteq_{as} p_j$  wie oben beschrieben wurde. Falls ein  $p_j$  vor  $p_n$  in  $E_P$  enthalten ist, dann ist ein Präfix von  $wv$  ein strikter Fehler-Trace in  $P$  und mit  $\text{prune}(w) = \text{prune}(wv)$  ist somit ein Präfix von  $w$  in  $ET(P)$  enthalten. Da  $ET$  unter Fortsetzung der Traces abgeschlossen ist, gilt auch  $w \in ET(P)$ . Es wird im Folgenden also davon ausgegangen, dass für alle  $p_j$  mit  $j < n$  gilt  $p_j \notin E_P$ . Es gelten somit alle Voraussetzungen für die Induktion und in  $P'$  gibt es die Transition  $p'_j \xrightarrow{\alpha_j}_{P'} p'_{j+1}$ . Mit Definition 1.3 3. folgt draus, dass es auch eine Transition  $p_j \xrightarrow{\alpha_j}_P p_{j+1}$  in  $P$  geben muss, so dass  $p'_{j+1} \sqsubseteq_{as} p_{j+1}$  gilt. Aus dieser Induktion kann nun gefolgert werden, dass  $p'_n \sqsubseteq_{as} p_n$  gelten muss. Da  $p'_n \in E_{P'}$  gilt, folgt draus mit 1.3 1., dass bereits  $p_n$  in  $E_P$  enthalten sein muss. Es gilt also  $wv \in StET(P')$  und mit der Argumentation von oben folgt daraus  $w \in ET(P)$ .
- Fall 2 ( $w \in MIT(P') \setminus PrET(P')$ ): Da  $w$  in  $MIT(P')$  enthalten ist, gibt es ein  $a \in I$  für das  $w = va$  gilt mit  $v \in \Sigma^*$ . Analog zu Fall 1 kann man auch den Input-kritischen Trace in  $P'$  darstellen als  $p'_0 \xrightarrow{\alpha_1}_{P'} p'_1 \xrightarrow{\alpha_2}_{P'} \dots p'_{n-1} \xrightarrow{\alpha_n}_{P'} p'_n$  wobei  $w = (\alpha_1\alpha_2 \dots \alpha_n)|_\Sigma$  und  $a = \alpha_n$  gilt. Mit einer analogen Induktion wie im letzten Fall für  $0 \leq j < n - 1$  kann  $p'_{n-1} \sqsubseteq_{as} p_{n-1}$  für einen Zustand  $p_{n-1}$  in  $P$  gefolgert werden, falls nicht davor ein  $p_j$  in der Induktion auftaucht, für das  $p_j \in E_P$  gilt. Falls eines der  $p_j$  mit  $0 \leq j \leq n - 1$  ein Fehler-Zustand ist, gilt  $w \in ET(P)$  mit der analogen Argumentation wie oben. Es wird im folgenden davon ausgegangen, dass  $p_{n-1}$  mit  $p'_{n-1}$  in Relation steht und keine Fehler-Zustände aufgetreten sind. Falls  $a$  für  $p_{n-1}$  eine ausgehende must-Transition wäre, würde 1.3 2. auch für  $p'_{n-1}$  die Implementierung der  $a$  Transition fordern und somit würde nicht  $va \in MIT(P')$  gelten. Es gilt also  $p \not\xrightarrow{a}$  und  $va \in MIT(P)$ . Daraus ergibt sich direkt  $w \in ET(P)$ .

2. „ $\subseteq$ “:

$$EL(P) \stackrel{3.5}{=} L(P) \cup ET(P)$$

$$\begin{aligned}
 & \stackrel{2.1}{\subseteq} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} L(P') \right) \cup ET(P) \\
 & \stackrel{1.}{=} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} L(P') \right) \cup \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} ET(P') \right) \\
 & = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} L(P') \cup ET(P') \\
 & \stackrel{3.5}{=} \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} EL(P').
 \end{aligned}$$

2. „ $\supseteq$ “:

Da der erste Punkt dieser Proposition bereits bewiesen ist, reicht es aus für diesen Punkt zu zeigen, dass  $\bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} EL(P') \setminus ET(P')$  eine Teilmenge von  $EL(P)$  ist. Die Menge  $EL(P') \setminus ET(P')$  entspricht  $L(P') \setminus ET(P')$ . Es muss also ein Wort  $w$  aus der Sprache einer as-Implementierung von  $P$  betrachtet werden, dass nicht in den Fehler-Traces dieser as-Implementierung enthalten ist. Das Wort  $w$  ist also in  $P'$  ausführbar. Falls das  $w$  in  $P$  jedoch nicht ausführbar ist, folgt wie zuvor  $w \in ET(P) \subseteq EL(P)$ , da ein Präfix von  $w$  in  $P$  zu einem Fehler-Zustand führen muss. Falls  $w$  ausführbar ist in  $P$  gilt  $w \in L(P) \subseteq EL(P)$ .  $\square$

**Satz 3.7 (Kommunikationsfehler-Semantik für Parallelkompositionen).** Für zwei komponierbare MEIOs  $P_1, P_2$  und ihre Komposition  $P_{12}$  gilt:

1.  $ET_{12} = \text{cont}(\text{prune}((ET_1 \parallel EL_2) \cup (EL_1 \parallel ET_2)))$ ,
2.  $EL_{12} = (EL_1 \parallel EL_2) \cup ET_{12}$ .

*Beweis.*

1. „ $\subseteq$ “:

Da beide Seiten der Gleichung unter der Fortsetzung  $\text{cont}$  abgeschlossen sind, genügt es ein präfix-minimales Element  $w$  von  $ET_{12}$  zu betrachten. Diese Element ist aufgrund der Definition der Menge der Fehler-Traces in  $MIT_{12}$  oder in  $PrET_{12}$  enthalten.

- Fall 1 ( $w \in MIT_{12}$ ): Aus der Definition von  $MIT$  folgt, dass es eine Aufteilung  $w = xa$  gibt mit  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{x}_{12} (p_1, p_2) \wedge a \in I_{12} \wedge (p_1, p_2) \not\xrightarrow{a}_{12}$ . Da  $I_{12} = (I_1 \cup I_2) \setminus (O_1 \cup O_2)$  ist, folgt  $a \in (I_1 \cup I_2)$  und  $a \notin (O_1 \cup O_2)$ . Es wird unterschieden, ob  $a \in (I_1 \cap I_2)$  oder  $a \in (I_1 \cup I_2) \setminus (I_1 \cap I_2)$  ist.
  - Fall 1a) ( $a \in (I_1 \cap I_2)$ ): Durch Projektion des Ablaufes auf die einzelnen Transitionssysteme erhält man oBdA  $p_{01} \xRightarrow{x_1}_1 p_1 \not\xrightarrow{a}_1$  und  $p_{02} \xRightarrow{x_2}_2 p_2 \not\xrightarrow{a}_2$  oder  $p_{02} \xRightarrow{x_2}_2 p_2 \xrightarrow{a}_2$  mit  $x \in x_1 \parallel x_2$ . Daraus kann  $x_1 a \in \text{cont}(MIT_1) \subseteq ET_1$  und  $x_2 a \in EL_2$  ( $x_2 a \in MIT_2$  oder  $x_2 a \in L_2$ ) gefolgert werden. Damit folgt

$w \in (x_1 \| x_2) \cdot \{a\} \subseteq (x_1 a) \| (x_2 a) \subseteq ET_1 \| EL_2$ , und somit ist  $w$  in der rechten Seite der Gleichung enthalten.

- Fall 1b) ( $a \in (I_1 \cup I_2) \setminus (I_1 \cap I_2)$ ): OBdA gilt  $a \in I_1$ . Durch die Projektion auf die einzelnen Komponenten erhält man:  $p_{01} \xRightarrow{x_1}_1 p_1 \not\xrightarrow{a}_1$  und  $p_{02} \xRightarrow{x_2}_2 p_2$  mit  $x \in x_1 \| x_2$ . Daraus folgt  $x_1 a \in \text{cont}(MIT_1) \subseteq ET_1$  und  $x_2 \in L_2 \subseteq EL_2$ . Somit gilt  $w \in (x_1 \| x_2) \cdot \{a\} \subseteq (x_1 a) \| x_2 \subseteq ET_1 \| EL_2$ . Dies ist eine Teilmenge der rechten Seite der Gleichung.
- Fall 2 ( $w \in PrET_{12}$ ): Aus der Definition von  $PrET$  und prune folgt, dass ein  $v \in O_{12}^*$  gibt, so dass  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{w}_{12} (p_1, p_2) \xRightarrow{v}_{12} (p'_1, p'_2)$  gilt mit  $(p'_1, p'_2) \in E_{12}$  und  $w = \text{prune}(wv)$ . Durch Projektion auf die Komponenten erhält man  $p_{01} \xRightarrow{w_1}_1 p_1 \xRightarrow{v_1}_1 p'_1$  und  $p_{02} \xRightarrow{w_2}_2 p_2 \xRightarrow{v_2}_2 p'_2$  mit  $w \in w_1 \| w_2$  und  $v \in v_1 \| v_2$ . Aus  $(p'_1, p'_2) \in ET_{12}$  folgt, dass es sich entweder um einen geerbten oder einen neuen Fehler handelt. Bei einem geerbten wäre bereits einer der beiden Zustände  $p'_1$  bzw.  $p'_2$  ein Fehler-Zustand gewesen. Ein neuer Fehler hingegen wäre durch das fehlen fehlende Sicherstellen der Synchronisation (fehlende must-Transition) in einer der Komponenten entstanden.
  - Fall 2a) (geerbter Fehler): OBdA gilt  $p'_1 \in E_1$ . Daraus folgt,  $w_1 v_1 \in StET_1 \subseteq \text{cont}(PrET_1) \subseteq ET_1$ . Da  $p_{02} \xRightarrow{w_2 v_2}_2$  gilt, erhält man  $w_2 v_2 \in L_2 \subseteq EL_2$ . Dadurch ergibt sich  $wv \in ET_1 \| EL_2$  mit  $w = \text{prune}(wv)$  und somit ist  $w$  in der rechten Seite der Gleichung enthalten.
  - Fall 2b) (neuer Fehler): OBdA gilt  $a \in I_1 \cap O_2$  mit  $p'_1 \not\xrightarrow{a}_1$  und  $p'_2 \xrightarrow{a}_2$ . Daraus folgt  $w_1 v_1 a \in MIT_1 \subseteq ET_1$  und  $w_2 v_2 a \in L_2 \subseteq EL_2$ . Damit ergibt sich  $wva \in ET_1 \| EL_2$ , da  $a \in O_1 \subseteq O_{12}$  gilt  $w = \text{prune}(wva)$  und somit ist  $w$  in der rechten Seite der Gleichung enthalten.

1. „ $\supseteq$ “:

Wegen der Abgeschlossenheit beider Seiten der Gleichung gegenüber  $\text{cont}$  wird auch in diesem Fall nur ein präfix-minimales Element  $x \in \text{prune}((ET_1 \| EL_2) \cup (EL_1 \| ET_2))$  betrachtet. Da  $x$  durch die Anwendung der  $\text{prune}$ -Funktion entstanden ist, existiert ein  $y \in O_{12}^*$  mit  $xy \in (ET_1 \| EL_2) \cup (EL_1 \| ET_2)$ . OBdA wird davon ausgegangen, dass  $xy \in ET_1 \| EL_2$  gilt, d.h. es gibt  $w_1 \in ET_1$  und  $w_2 \in EL_2$  mit  $xy \in w_1 \| w_2$ .

Im Folgenden wird für alle Fälle von  $xy$  gezeigt, dass es ein  $v \in PrET_{12} \cup MIT_{12}$  gibt, das ein Präfix von  $xy$  ist und  $v$  entweder auf einen Input  $I_{12}$  endet oder  $v = \varepsilon$ . Damit muss  $v$  ein Präfix von  $x$  sein.  $\varepsilon$  ist Präfix von jedem Wort und sobald  $v$  mindestens einen Buchstaben enthält, muss das Ende von  $v$  vor dem Anfang von  $y \in O_{12}^*$  liegen. Dadurch ist ein Präfix von  $x$  in  $PrET_{12} \cup MIT_{12}$  enthalten und somit gilt  $x \in ET_{12}$ , da  $ET$  die Fortsetzung der Mengenvereinigung aus  $PrET$  und  $MIT$  ist.

Sei  $v_1$  das kürzeste Präfix von  $w_1$  in  $PrET_1 \cup MIT_1$ . Falls  $w_2 \in L_2$ , so sei  $v_2 = w_2$ , sonst soll  $v_2$  das kürzeste Präfix von  $w_2$  in  $PrET_2 \cup MIT_2$  sein. Jede Aktion in  $v_1$  und  $v_2$  hängt mit einer aus  $xy$  zusammen. Es kann nun davon ausgegangen werden, dass entweder  $v_2 = w_2 \in L_2$  gilt oder die letzte Aktion von  $v_1$  vor oder gleichzeitig mit der

letzten Aktion von  $v_2$  statt findet. Ansonsten endet  $v_2 \in PrET_2 \cup MIT_2$  vor  $v_1$  und somit ist dieser Fall analog zu  $v_1$  endet vor  $v_2$ .

- Fall 1 ( $v_1 = \varepsilon$ ): Da  $\varepsilon \in PrET_1 \cup MIT_1$ , ist bereits in  $P_1$  ein Fehler-Zustand lokal erreichbar.  $\varepsilon \in MIT_1$  ist nicht möglich, da jedes Element aus  $MIT$  nach Definition mindestens die Länge 1 haben muss. Mit der Wahl  $v'_2 = v' = \varepsilon$  ist  $v'_2$  ein Präfix von  $v_2$ .
- Fall 2 ( $v_1 \neq \varepsilon$ ): Aufgrund der Definitionen von  $PrET$  und  $MIT$  endet  $v_1$  auf ein  $a \in I_1$ , d.h.  $v_1 = v'_1 a$ .  $v'$  sei das Präfix von  $xy$ , das mit der letzten Aktion von  $v_1$  endet, d.h. mit  $a$  und  $v'_2 = v'|_{\Sigma_2}$ . Falls  $v_2 = w_2 \in L_2$ , dann ist  $v'_2$  ein Präfix von  $v_2$ . Falls  $v_2 \in PrET_2 \cup MIT_2$  gilt, dann ist durch die Annahme, dass  $v_2$  nicht vor  $v_1$  endet,  $v'_2$  ein Präfix von  $v_2$ . Im Fall  $v_2 \in MIT_2$  weiß man zusätzlich, dass  $v_2$  auf  $b \in I_2$  endet. Es kann jedoch  $a = b$  gelten.

In allen Fällen erhält man  $v'_2 = v'|_{\Sigma_2}$  ist ein Präfix von  $v_2$  und  $v' \in v_1 \| v'_2$  ist ein Präfix von  $xy$ . Es kann nur für die Fälle  $a \notin I_2$  gefolgert werden, dass  $p_{02} \xRightarrow{v'_2}_2$  gilt.

- Fall I ( $v_1 \in MIT_1$  und  $v_1 \neq \varepsilon$ ): Es gibt einen Ablauf der Form  $p_{01} \xRightarrow{v'_1}_1 p_1 \xrightarrow{q}_1$  und es gilt  $v' = v''a$ .
  - Fall Ia) ( $a \notin \Sigma_2$ ): Es gilt  $p_{02} \xRightarrow{v'_2}_2 p_2$  mit  $v'' \in v'_1 \| v'_2$ . Dadurch erhält man  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{v''}_{12} (p_1, p_2) \xrightarrow{q}_{12}$  mit  $a \in I_{12}$ . Somit wird  $v := v''a = v' \in MIT_{12}$  gewählt.
  - Fall Ib) ( $a \in I_2$  und  $v'_2 \in MIT_2$ ): Es gilt  $v'_2 = v''_2 a$  mit  $p_{02} \xRightarrow{v''_2}_2 \xrightarrow{q}_2$  und  $v'' \in v'_1 \| v''_2$ .  $a$  ist für  $P_2$ , ebenso wie für  $P_1$ , ein nicht sichergestellter Input. Daraus folgt, dass  $(p_1, p_2) \xrightarrow{q}_{12}$  gilt. Es wird ebenfalls  $v := v''a = v' \in MIT_{12}$  gewählt.
  - Fall Ic) ( $a \in I_2$  und  $v'_2 \in L_2 \setminus MIT_2$ ): Es gilt  $p_{02} \xRightarrow{v''_2}_2 p_2 \xrightarrow{a}_2$  mit  $v'_2 = v''_2 a$ . Da die gemeinsamen Inputs synchronisiert werden, folgt  $(p_1, p_2) \xrightarrow{q}_{12}$  bereits aus  $q_1 \xrightarrow{q}_1$ . Somit kann hier nochmals  $v := v''a = v' \in MIT_{12}$  gewählt werden.
  - Fall Id) ( $a \in O_2$ ): Es gilt  $v'_2 = v''_2 a$  und  $p_{02} \xRightarrow{v'_2}_2$ . Man erhält also  $p_{02} \xRightarrow{v''_2}_2 p_2 \xrightarrow{a}_2$  mit  $v'' \in v'_1 \| v''_2$ . Daraus ergibt sich  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{v''}_{12} (p_1, p_2)$  mit  $p_2 \xrightarrow{a}_2$ ,  $p_1 \xrightarrow{q}_1$ ,  $a \in I_1$  und  $a \in O_2$ , somit gilt  $(p_1, p_2) \in E_{12}$ . Es wird  $v := \text{prune}(v'') \in PrET_{12}$  gewählt.
- Fall II ( $v_1 \in PrET_1$ ):  $\exists u_1 \in O_1^* : p_{01} \xRightarrow{v_1}_1 p_1 \xRightarrow{u_1}_1 p'_1$  mit  $p'_1 \in E_1$ . Im Fall  $v'_1 \neq \varepsilon$  kann das  $a$ , auf das  $v_1$  endet, ebenfalls der letzte Buchstabe von  $v_2$  sein. Im Fall von  $v_2 \in MIT_2$  kann somit  $a = b$  gelten, wodurch  $v_2 = v'_2$  gilt. Dieser Fall verläuft jedoch analog zu Fall Ic) und wird hier nicht weiter betrachtet. Es gilt für alle anderen Fälle  $p_{02} \xRightarrow{v'_2}_2 p_2$  mit  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{v'}_{12} (p_1, p_2)$ .

- Fall IIa) ( $u_2 \in (O_1 \cap I_2)^*, c \in (O_1 \cap I_2)$ , sodass  $u_2c$  Präfix von  $u_1|_{I_2}$  mit  $p_2 \xRightarrow{u_2}_2 p'_2 \not\xrightarrow{c}_2$ ): Für das Präfix  $u'_1c$  von  $u_1$  mit  $(u'_1c)|_{I_2} = u_2c$  weiß man, dass  $q_1 \xRightarrow{u'_1}_1 q''_1 \not\xrightarrow{c}_1$ . Somit gilt  $u'_1 \in u'_1\|u_2$  und  $(p_1, p_2) \xRightarrow{u'_1}_{12} (q'_1, q'_2) \in E_{12}$ , da für  $P_2$  der entsprechende Input nicht sichergestellt wird, der mit dem  $c$  Output von  $P_1$  zu koppeln wäre. Es handelt sich also um einen neuen Fehler. Es wird  $v := \text{prune}(v'u'_1) \in \text{PrET}_{12}$  gewählt, dies ist ein Präfix von  $v'$ , da  $u_1 \in O_1^*$ .
- Fall IIb) ( $p_2 \xRightarrow{u_2}_2 p'_2$  mit  $u_2 = u_1|_{I_2}$ ): Es gilt  $u_1 \in u_1\|u_2$  und  $(p_1, p_2) \xRightarrow{u_1}_{12} (p'_1, p'_2) \in E_{12}$ , da  $p'_1 \in E_1$  und somit handelt es sich in  $P_{12}$  um einen geerbten Fehler. Nun wird  $v := \text{prune}(v'u_1) \in \text{PrET}_{12}$  gewählt, das wiederum ein Präfix von  $v'$  ist.

2.:

Durch die Definitionen ist klar, dass  $L_i \subseteq EL_i$  und  $ET_i \subseteq EL_i$  gilt. Die Argumentation startet auf den rechten Seite der Gleichung:

$$\begin{aligned}
 (EL_1\|EL_2) \cup ET_{12} &\stackrel{3.5}{=} ((L_1 \cup ET_1) \| (L_2 \cup ET_2)) \cup ET_{12} \\
 &= (L_1\|L_2) \cup \underbrace{(L_1\|ET_2)}_{\substack{\subseteq (EL_1\|ET_2) \\ \stackrel{1.}{\subseteq} ET_{12}}} \cup \underbrace{(ET_1\|L_2)}_{\substack{\subseteq (ET_1\|EL_2) \\ \stackrel{1.}{\subseteq} ET_{12}}} \cup \underbrace{(ET_1\|ET_2)}_{\substack{\subseteq (EL_1\|ET_2) \\ \stackrel{1.}{\subseteq} ET_{12}}} \cup ET_{12} \\
 &= (L_1\|L_2) \cup ET_{12} \\
 &\stackrel{2.2}{=} L_{12} \cup ET_{12} \\
 &\stackrel{3.5}{=} EL_{12}.
 \end{aligned}$$

□

**Korollar 3.8 (Kommunikationsfehler-Präkongruenz).** Die Relation  $\sqsubseteq_E$  ist eine Präkongruenz bezüglich  $\cdot\|\cdot$ .

*Beweis.* Es muss gezeigt werden: Wenn  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  gilt, dann für jedes komponierbare  $P_3$  auch  $P_{31} \sqsubseteq_E P_{32}$ . D.h. es ist zu zeigen, dass aus  $ET_1 \subseteq ET_2$  und  $EL_1 \subseteq EL_2$ ,  $ET_{31} \subseteq ET_{32}$  und  $EL_{31} \subseteq EL_{32}$  folgt. Dies ergibt sich aus der Monotonie von  $\text{cont}$ ,  $\text{prune}$  und  $\cdot\|\cdot$  auf Sprachen wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad ET_{31} &\stackrel{3.7 \ 1.}{=} \text{cont}(\text{prune}((ET_3\|EL_1) \cup (EL_3\|ET_1))) \\
 &\quad \begin{array}{l} ET_1 \subseteq ET_2 \\ \text{und} \\ EL_1 \subseteq EL_2 \end{array} \\
 &\subseteq \text{cont}(\text{prune}((ET_3\|EL_2) \cup (EL_3\|ET_2))) \\
 &\stackrel{3.7 \ 1.}{=} ET_{32},
 \end{aligned}$$

- $EL_{31} \stackrel{3.7}{=}^2 (EL_3 \parallel EL_1) \cup E_{31}$   
 $\begin{array}{c} EL_1 \subseteq EL_2 \\ \text{und} \\ ET_{31} \subseteq ET_{32} \end{array} \subseteq (EL_3 \parallel EL_2) \cup ET_{32}$   
 $\stackrel{3.7}{=}^2 EL_{32}.$

□

**Lemma 3.9 (Verfeinerung mit Kommunikationsfehlern).** *Gegeben sind zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  mit der gleichen Signatur. Wenn  $U \parallel P_1 \sqsubseteq_E^B U \parallel P_2$  für alle Partner  $U$  gilt, dann folgt daraus die Gültigkeit von  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$ .*

*Beweis.* Da  $P_1$  und  $P_2$  die gleiche Signaturen haben wird  $I := I_1 = I_2$  und  $O := O_1 = O_2$  definiert. Für jeden Partner  $U$  gilt  $I_U = O$  und  $O_U = I$ .

Um  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  zu zeigen, wird nachgeprüft, ob folgendes gilt:

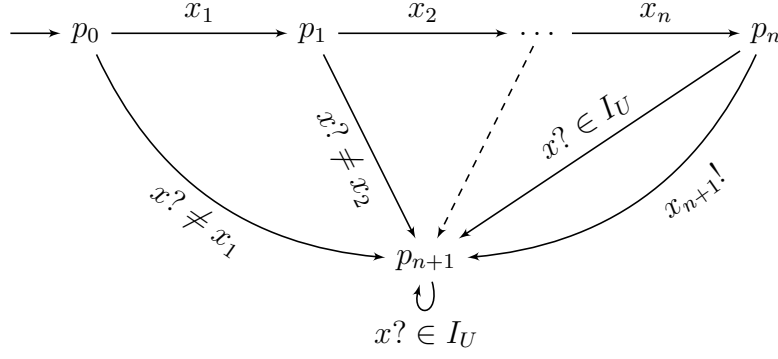
- $ET_1 \subseteq ET_2$ ,
- $EL_1 \subseteq EL_2$ .

Für ein gewähltes präfix-minimales Element  $w \in ET_1$  wir gezeigt, dass dieses  $w$  oder eines seiner Präfixe in  $ET_2$  enthalten ist. Dies ist möglich, da die beiden Mengen  $ET_1$  und  $ET_2$  durch cont abgeschlossen sind.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Es handelt sich um einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand in  $P_1$ . Für  $U$  wird ein Transitionssystem verwendet, das nur aus dem Startzustand und einer must-Schleife für alle Inputs  $x \in I_U$  besteht. Somit kann  $P_1$  die im Prinzip gleichen Fehler-Zustände lokal erreichen wie alle möglichen as-Implementierungen von  $U \parallel P_1$  zusammen. Daraus folgt, dass auch mindestens eine as-Implementierung von  $U \parallel P_2$  einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand haben muss. Durch die Definition von  $U$  kann dieser Fehler nur von  $P_2$  geerbt sein. Es muss also in  $P_2$  ein Fehler-Zustand durch interne Aktionen und Outputs erreichbar sein, d.h. es gilt  $\varepsilon \in PrET_2$ .
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n x_{n+1} \in \Sigma^+$  mit  $n \geq 0$  und  $x_{n+1} \in I = O_U$ ): Es wird der folgende Partner  $U$  betrachtet (siehe auch Abbildung 3.1):

- $U = \{p_0, p_1, \dots, p_{n+1}\}$ ,
- $p_{0U} = p_0$ ,
- $\rightarrow_U = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p_{n+1}) \mid x \in I_U \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_{n+1}, x, p_{n+1}) \mid x \in I_U\}$ ,
- $E_U = \emptyset$ .

Für  $w$  können nun zwei Fälle unterschieden werden. Aus beiden wird folgen, dass für mindestens eine as-Implementierung  $P'$  von  $U \parallel P_1$   $\varepsilon \in PrET(P')$  gilt.


 Abbildung 3.1:  $x? \neq x_j$  steht für alle  $x \in I_U \setminus \{x_j\}$ 

- Fall 2a) ( $w \in MIT_1$ ): In  $U \parallel P_1$  erhält man  $(p_0, p_{01}) \xrightarrow{x_1 \dots x_n}_{U \parallel P_1} (p_n, p')$  mit  $p' \not\xrightarrow{x_{n+1}}_1$  und  $p_n \xrightarrow{x_{n+1}}_U$ . Deshalb gilt  $(p_n, p') \in E_{U \parallel P_1}$ . Da alle Aktionen aus  $w$  bis auf  $x_{n+1}$  synchronisiert werden und  $I \cap I_U = \emptyset$ , gilt  $x_1, \dots, x_n \in O_{U \parallel P_1}$ . Da  $(p_n, p') \in E_{U \parallel P_1}$  gibt es mindestens ein  $P'$  in  $\text{as-impl}(U \parallel P_1)$ , das diesen Fehler-Zustand ebenfalls enthält. Daraus ergibt sich dann  $\varepsilon \in \text{PrET}(P')$ .
- Fall 2b) ( $w \in \text{PrET}_1$ ): In der Parallelkomposition von  $U$  und  $P_1$  erhält man  $(p_0, p_{01}) \xrightarrow{w}_{U \parallel P_1} (p_{n+1}, p'') \xrightarrow{u}_{U \parallel P_1} (p_{n+1}, p')$  für  $u \in O^*$  und  $p' \in E_1$ . Daraus folgt  $(p_{n+1}, p') \in E_{U \parallel P_1}$  und somit  $wu \in \text{StET}(U \parallel P_1)$ . Da alle Aktionen in  $w$  synchronisiert werden und  $I \cap I_U = \emptyset$ , gilt  $x_1, \dots, x_n, x_{n+1} \in O_{U \parallel P_1}$  und, da  $u \in O^*$ , folgt  $u \in O_{U \parallel P_1}^*$ . Somit ergibt sich für eine as-Implementierung  $P'$  von  $U \parallel P_1$   $\varepsilon \in \text{PrET}(P')$ .

Da  $\varepsilon \in \text{PrET}(P')$  für ein  $P'$  aus  $\text{as-impl}(U \parallel P_1)$  gilt, kann durch  $U \parallel P_1 \sqsubseteq_E^B U \parallel P_2$  geschlossen werden, dass auch in mindestens einer as-Implementierung von  $U \parallel P_2$  ein Fehler-Zustand lokal erreichbar sein muss. Da as-Implementierungen die Definition 1.3 erfüllen müssen, muss falls in einer as-Implementierung von  $U \parallel P_2$  ein Fehler lokal erreichbar ist auch in  $U \parallel P_2$  ein Fehler-Zustand lokal erreichbar sein. Der in  $U \parallel P_2$  erreichbare Fehler kann geerbt oder neu sein.

- Fall 2i) (neuer Fehler): Da jeder Zustand von  $U$  alle Inputs  $x \in O = I_U$  durch must-Transitionen sicherstellt, muss ein lokal erreichbarer Fehler-Zustand der Form sein, dass ein Output  $a \in O_U$  von  $U$  möglich ist, der nicht mit einem passenden Input aus  $P_2$  synchronisiert werden muss ( $P_2$  enthält die entsprechende  $a$  Transitionen nicht als must-Transition). Durch die Konstruktion von  $U$  sind in  $p_{n+1}$  keine Outputs möglich. Ein neuer Fehler muss also die Form  $(p_i, p')$  haben mit  $i \leq n, p' \not\xrightarrow{x_{i+1}}_2$  und  $x_{i+1} \in O_U = I$ . Durch Projektion erhält man dann  $p_{02} \xrightarrow{x_1 \dots x_i}_2 p' \not\xrightarrow{x_{i+1}}_2$  und damit gilt  $x_1 \dots x_{i+1} \in MIT_2 \subseteq ET_2$ . Somit ist ein Präfix von  $w$  in  $ET_2$  enthalten.
- Fall 2ii) (geerbter Fehler):  $U$  hat  $x_1 \dots x_i u$  mit  $u \in I_U^* = O^*$  ausgeführt und ebenso hat  $P_2$  dieses Wort abgearbeitet. Durch dies hat  $P_2$  einen Zustand

in  $E_2$  erreicht, da von  $U$  keine Fehler geerbt werden können. Es gilt dann  $\text{prune}(x_1 \dots x_i u) = \text{prune}(x_1 \dots x_i) \in \text{PrET}_2 \subseteq \text{ET}_2$ . Da  $x_1 \dots x_i$  ein Präfix von  $w$  ist, führt in diesem Fall eine Verlängerung um lokale Aktionen von einem Präfix von  $w$  zu einem Fehler-Zustand. Da  $\text{ET}$  der Menge aller Verlängerungen von gekürzten Fehler-Traces entspricht, ist  $x_1 \dots x_i$  in  $\text{ET}_2$  enthalten und somit ist ein Präfix von  $w$  in  $\text{ET}_2$  enthalten.

Um die andere Inklusion zu beweisen, reicht es aufgrund der ersten Inklusion und der Definition von  $EL$  aus zu zeigen, dass  $L_1 \setminus \text{ET}_1 \subseteq EL_2$  gilt.

Es wird dafür ein beliebiges  $w \in L_1 \setminus \text{ET}_1$  gewählt und gezeigt, dass es in  $EL_2$  enthalten ist.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Da  $\varepsilon$  immer in  $EL_2$  enthalten ist, muss hier nichts gezeigt werden.
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n$  mit  $n \geq 1$ ): Es wird ein Partner  $U$  wie folgt konstruiert (siehe dazu auch Abbildung 3.2):

- $U = \{p_0, p_1, \dots, p_n, p\}$ ,
- $p_{0U} = p_0$ ,
- $\rightarrow_U = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p) \mid x \in I_U \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p, x, p) \mid x \in I_U\}$ ,
- $E_U = \{p_n\}$ .

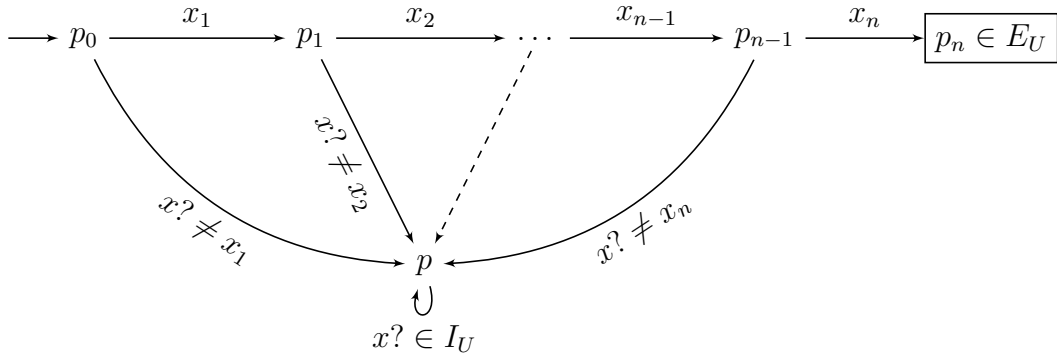


Abbildung 3.2:  $x? \neq x_j$  steht für alle  $x \in I_U \setminus \{x_j\}$ ,  $p_n$  ist der einzige Fehler-Zustand

Da  $p_{01} \xRightarrow{w}_1 p'$  gilt, kann man schließen, dass  $U \parallel P_1$  einen lokal erreichbaren geerbten Fehler hat. Es gibt also auch mindestens eine as-Implementierung in der Menge  $\text{as-impl}(U \parallel P_1)$ , die diesen lokal erreichbaren Fehler implementiert. Somit muss es eine as-Implementierung von  $U \parallel P_2$  geben, die ebenfalls einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand hat. Aufgrund von Definition 1.3 3. muss dann ebenfalls ein Fehler-Zustand in  $U \parallel P_2$  lokal erreichbar sein.



- Fall 2a) (neuer Fehler aufgrund von  $x_i \in O_U$  und  $p_{02} \xrightarrow{x_1 \dots x_{i-1}}_2 p'' \not\xrightarrow{x_i}_2$ ): Es gilt  $x_1 \dots x_i \in MIT_2$  und somit  $w \in EL_2$ . Anzumerken ist, dass es nur auf diesem Weg Outputs von  $U$  möglich sind, deshalb gibt es keine anderen Outputs von  $U$ , die zu einem neuen Fehler führen können.
- Fall 2b) (neuer Fehler aufgrund von  $a \in O = I_U$ ): Der einzige Zustand, in dem  $U$  nicht alle Inputs erlaubt sind, ist  $p_n$ , der bereits ein Fehler-Zustand ist. Da in diesem Fall dieser Zustand in  $U \parallel P_2$  erreichbar ist, besitzt das komponierte MEIO einen geerbten Fehler und es gilt  $w \in L_2 \subseteq EL_2$ , wegen dem folgenden Fall 2c).
- Fall 2c) (geerbter Fehler von  $U$ ): Da  $p_n$  der einzige Fehler-Zustand in  $U$  ist und alle Aktionen synchronisiert sind, ist dies nur möglich, wenn  $p_{02} \xrightarrow{x_1 \dots x_n}_2$  gilt. In diesem Fall gilt  $w \in L_2 \subseteq EL_2$ .
- Fall 2d) (geerbter Fehler von  $P_2$ ): Es gilt dann  $p_{02} \xrightarrow{x_1 \dots x_i u}_2 p' \in E_2$  für  $i \geq 0$  und  $u \in O^*$ . Somit ist  $x_1 \dots x_i u \in StET_2$  und damit  $\text{prune}(x_1 \dots x_i u) = \text{prune}(x_1 \dots x_i) \in PrET_2 \subseteq EL_2$ . Es gilt also  $w \in EL_2$ .

□

Der folgende Satz sagt aus, dass  $\sqsubseteq_E$  die größte Präkongruenz ist, die charakterisiert werden soll, also gleich der vollständig abstrakten Präkongruenz  $\sqsubseteq_E^C$ .

**Satz 3.10 ( Vollständige Abstraktheit für Kommunikationsfehler-Semantik ).**

Für zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  mit derselben Signatur gilt  $P_1 \sqsubseteq_E^C P_2 \Leftrightarrow P_1 \sqsubseteq_E P_2$ .

*Beweis.*

„ $\Leftarrow$ “: Nach Definition gilt, genau dann wenn  $\varepsilon \in ET(P)$ , ist ein Fehler-Zustand lokal erreichbar in  $P$ .  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  impliziert, dass  $\varepsilon \in ET_2$  gilt, wenn  $\varepsilon \in ET_1$ . Somit ist ein Fehler-Zustand in  $P_1$  nur dann lokal erreichbar, wenn dieser auch in  $P_2$  lokal erreichbar ist. Falls es also eine as-Implementierung von  $P_1$  gibt, in der ein Fehler-Zustand lokal erreichbar ist, dann gibt es auch mindestens eine as-Implementierung von  $P_2$ , die einen Fehler-Zustand lokal erreichen kann. Dadurch folgt, dass  $P_1 \sqsubseteq_E^B P_2$  gilt, da  $\sqsubseteq_E^B$  in Definition 3.2 über die lokale Erreichbarkeit der Fehler-Zustände in den as-Implementierungen definiert wurde und die  $ET$ -Mengen von  $P_1$  und  $P_2$  auch in der Vereinigung der Traces ihrer as-Implementierungen enthalten sind, wie in Proposition 3.6, ausgedrückt werden können. Es ist also  $\sqsubseteq_E$  in  $\sqsubseteq_E^B$  enthalten. Wie in Korollar 3.8 gezeigt, ist  $\sqsubseteq_E$  eine Präkongruenz bezüglich  $\cdot\parallel\cdot$ . Da  $\sqsubseteq_E^C$  die größte Präkongruenz bezüglich  $\cdot\parallel\cdot$  ist, die in  $\sqsubseteq_E^B$  enthalten ist, muss  $\sqsubseteq_E$  in  $\sqsubseteq_E^C$  enthalten sein. Es folgt also aus  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$ , dass auch  $P_1 \sqsubseteq_E^C P_2$  gilt.

„ $\Rightarrow$ “: Durch die Definition von  $\sqsubseteq_E^C$  als Präkongruenz in 3.2 folgt aus  $P_1 \sqsubseteq_E^C P_2$ , dass  $U \parallel P_1 \sqsubseteq_E^C U \parallel P_2$  für alle MEIOs  $U$  gilt, die mit  $P_1$  komponierbar sind. Da  $\sqsubseteq_E^C$  nach Definition auch in  $\sqsubseteq_E^B$  enthalten sein soll, folgt aus  $U \parallel P_1 \sqsubseteq_E^C U \parallel P_2$  auch die Gültigkeit von  $U \parallel P_1 \sqsubseteq_E^B U \parallel P_2$  für alle diese MEIOs  $U$ . Mit Lemma 3.9 folgt dann  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$ . □

Es wurde somit eine Kette an Folgerungen gezeigt, die sich zu einem Ring schließt. Dies ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

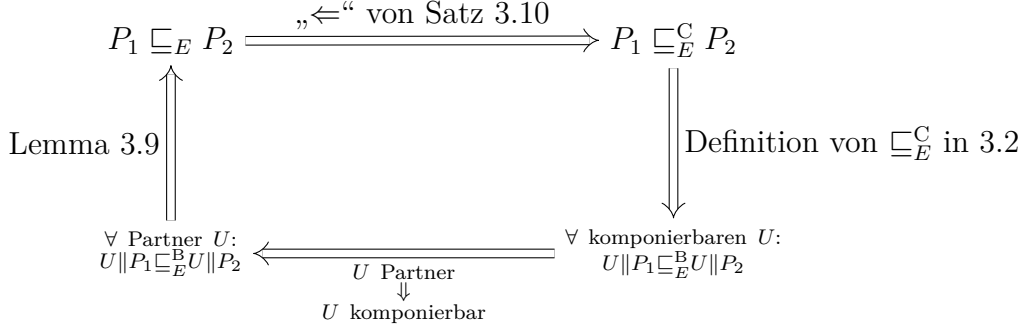


Abbildung 3.3: Folgerungskette der Fehler-Relationen

Angenommen man definiert, dass  $P_1 P_2$  verfeinern soll, genau dann wenn für alle Partner MEIOs  $U$ , für die  $P_2$  fehler-frei mit  $U$  kommuniziert, folgt, dass  $P_1$  ebenfalls fehler-frei mit  $U$  kommuniziert. Dann wird auch diese Verfeinerung durch  $\subseteq_E$  charakterisiert.

**Korollar 3.11.** *Es gilt:  $P_1 \subseteq_E P_2 \Leftrightarrow U || P_1 \subseteq_E^B U || P_2$  für alle Partner  $U$ .*

## 3.2 Testing-Ansatz

Der Testing-Ansatz stützt sich auf den Ansatz, der in [BV15b] angewendet wurde. Jedoch sind Tests dort Tupel aus einer Implementierung und einer Menge an Aktionen, über denen synchronisiert werden soll. Die MEIOs, die hier komponiert werden bringen die Menge Synch an Aktionen, die synchronisiert werden bereits mit. Es wird im Gegensatz zu [BV15b] mit Inputs und Outputs gearbeitet und dadurch scheint der Ansatz die gemeinsamen Aktionen zu synchronisieren natürlicher, wie eine Menge beim Test vorzugeben.

Die Definition von lokaler Erreichbarkeit eines Fehler-Zustandes soll aus dem Erweiterungs-Ansatz übernommen werden.

**Definition 3.12 (Test und Verfeinerung für Kommunikationsfehler).** *Ein Test  $T$  ist eine Implementierung. Ein MEIO  $P$  as-erfüllt einen Kommunikationsfehler-Test  $T$ , falls  $S || T$  fehler-frei ist für alle  $S \in \text{as-impl}(P)$ . Es wird dann  $P \text{ sat}_{\text{as}}^E T$  geschrieben.*

*Ein MEIO  $P$  verfeinert  $P'$ , falls für alle Tests  $T$ :  $P' \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow P \text{ sat}_{\text{as}}^E T$ .*

Die Definition 3.3 der Kommunikationsfehler-Traces eines MEIOs  $P$  kann aus dem Erweiterungs-Ansatz übernommen werden. Ebenso wie die Definition der Kommunikationsfehler-Semantik aus 3.5. Daraus kann dann auch in diesem Ansatz der Satz 3.7,

das Korollar 3.8 und die Propositionen 3.4 und 3.6 beweisen werden.

Die Basisrelation aus dem Erweiterungs-Ansatz gibt es in diesem Ansatz nicht, somit kann das Lemma 3.9 nicht in dieser Art formuliert werden. Jedoch kann hier jetzt mit Tests gearbeitet werden.

**Lemma 3.13 (Testing-Verfeinerung mit Kommunikationsfehlern).** *Gegeben sind zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  mit der gleichen Signatur. Wenn für alle Tests  $T$ , die Partner von  $P_1$  bzw.  $P_2$  sind,  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$  gilt, dann folgt daraus die Gültigkeit von  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$ .*

*Beweis.* Da  $P_1$  und  $P_2$  die gleichen Signaturen haben wird  $I := I_1 = I_2$  und  $O := O_1 = O_2$  definiert. Für jeden Test Partner  $T$  gilt  $I_T = O$  und  $O_T = I$ .

Um  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  zu zeigen, wird nachgeprüft, ob folgendes gilt:

- $ET_1 \subseteq ET_2$ ,
- $EL_1 \subseteq EL_2$ .

Für ein gewähltes präfix-minimales Element  $w \in ET_1$  wird gezeigt, dass dies  $w$  oder eines seiner Präfixe in  $ET_2$  enthalten ist. Dies ist möglich, da die beiden Mengen  $ET_1$  und  $ET_2$  durch cont abgeschlossen sind.

Mit Proposition 3.6 folgt aus  $w \in ET_1$ , dass es auch eine as-Implementierung  $P'_1$  von  $P_1$  geben muss, für die  $w$  ebenfalls in  $ET_{P'_1}$  enthalten ist.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Es ist ein Fehler-Zustand in  $P'_1$  lokal erreichbar. Für  $T$  wird ein Transitionssystem verwendet, das nur aus dem Startzustand und einer must-Schleife für alle Inputs  $x \in I_T$  besteht. Somit kann  $P'_1$  die im Prinzip gleichen Fehler-Zustände lokal erreichen wie  $P'_1 \| T$ .  $P'_1$  ist in Parallelkomposition mit  $T$  nicht fehler-frei somit gilt  $P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$  nicht. Es darf also auch  $P_2$  den Test  $T$  nicht as-erfüllen, wegen der Implikation  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$ . Damit  $P_2$   $T$  nicht as-erfüllt muss es eine as-Implementierungen  $P'_2$  geben, die in Parallelkomposition mit  $T$  zu einem nicht fehler-freien System führt. Da  $T$  ein Partner von  $P'_2$  ist, gibt es in der Parallelkomposition nur lokale Aktionen. Somit muss in  $P'_2 \| T$  ein Fehler lokal erreichbar sein. Durch die Definition von  $T$  kann dieser Fehler nur von  $P'_2$  geerbt sein. In  $P'_2$  kann dieser Fehler-Zustand nur durch interen Aktionen und Outputs erreichbar sein, da  $T$  keine Outputs besitzt, die man mit Inputs aus  $P'_2$  synchronisieren könnte und unsynchronisierte Aktionen sind in einer Parallelkomposition von Partner nicht möglich. Somit gilt  $\varepsilon \in PrET_{P'_2} \subseteq ET_{P'_2}$ . Mit Proposition 3.6 folgt daraus  $\varepsilon \in ET_2$ .
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n x_{n+1} \in \Sigma^+$  mit  $n \geq 0$  und  $x_{n+1} \in I = O_T$ ): Es wird der folgende Partner  $T$  betrachtet (dieser entspricht bis auf die Benennung der Mengen dem Transitionssystem  $U$  aus Abbildung 3.1):

- $T = \{p_0, p_1, \dots, p_{n+1}\}$ ,
- $p_{0T} = p_0$ ,

- $\rightarrow_T = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p_{n+1}) \mid x \in I_T \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_{n+1}, x, p_{n+1}) \mid x \in I_T\},$
- $E_T = \emptyset.$

Für  $w$  können nun zwei Fälle unterschieden werden, für die beide  $\varepsilon \in PrET(P'_1 \parallel T)$  folgen wird.

- Fall 2a) ( $w \in MIT_{P'_1}$ ): In  $P'_1 \parallel T$  erhält man  $(p'_{01}, p_0) \xrightarrow{x_1 \dots x_n}_{P'_1 \parallel T} (p', p_n)$  mit  $p' \not\xrightarrow{x_{n+1}}_{P'_1}$  und  $p_n \xrightarrow{x_{n+1}}_T$ . Deshalb gilt  $(p', p_n) \in E_{P'_1 \parallel T}$ . Da alle Aktionen aus  $w$  bis auf  $x_{n+1}$  synchronisiert werden und  $I \cap I_T = \emptyset$ , gilt  $x_1, \dots, x_n \in O_{P'_1 \parallel T}$ . Es gilt also  $\varepsilon \in PrET(P'_1 \parallel T)$ .
- Fall 2b) ( $w \in PrET_{P'_1}$ ): In der Parallelkomposition  $P'_1 \parallel T$  erhält man die Transitionsfolge  $(p_{01}, p_0) \xrightarrow{w}_{P'_1 \parallel T} (p'', p_{n+1}) \xrightarrow{u}_{P'_1 \parallel T} (p', p_{n+1})$  für  $u \in O^*$  und  $p' \in E_{P'_1}$ . Daraus folgt  $(p', p_{n+1}) \in E_{P'_1 \parallel T}$  und somit  $wu \in StET(P'_1 \parallel T)$ . Da alle Aktionen in  $w$  synchronisiert werden und  $I \cap I_T = \emptyset$ , gilt  $x_1, \dots, x_n, x_{n+1} \in O_{P'_1 \parallel T}$  und, da  $u \in O^*$ , folgt  $u \in O_{P'_1 \parallel T}^*$ . Somit ergibt sich  $\varepsilon \in PrET(P'_1 \parallel T)$ .

Da  $\varepsilon \in PrET(P'_1 \parallel T)$  gilt, kann durch  $P_2 \text{sat}_{as}^E T \Rightarrow P_1 \text{sat}_{as}^E T$  geschlossen werden, dass auch  $P_2 \text{sat}_{as}^E T$  nicht gelten kann. Die Relation gilt für  $P_2$  nicht, da es eine as-Implementierung  $P'_2$  von  $P_2$  gibt, so dass  $P'_2 \parallel T$  nicht fehler-frei ist. Da es nur lokale Aktionen in  $P'_2 \parallel T$  gibt, muss der Fehler-Zustand lokal erreichbar sein.

Der Fehler kann geerbt oder neu sein.

- Fall 2i) (neuer Fehler): Da jeder Zustand von  $T$  alle Inputs  $x \in O = I_T$  zulässt, muss ein lokal erreichbarer Fehler-Zustand der Form sein, dass ein Outputs  $a \in O_T$  von  $T$  möglich ist, der nicht mit einem passenden Input aus  $P'_2$  synchronisiert werden werden kann. Durch die Konstruktion von  $T$  sind in  $p_{n+1}$  keine Outputs möglich. Ein neuer Fehler muss also die Form  $(p', p_i)$  haben mit  $i \leq n$ ,  $p' \not\xrightarrow{x_{i+1}}_{P'_2}$  und  $x_{i+1} \in O_T = I$ . Durch Projektion erhält man dann  $p_{02} \xrightarrow{x_1 \dots x_i}_{P'_2} p' \not\xrightarrow{x_{i+1}}_{P'_2}$  und damit gilt  $x_1 \dots x_{i+1} \in MIT_{P'_2} \subseteq ET_{P'_2}$ . Es ist also ein Präfix von  $w$  in  $ET_{P'_2}$  enthalten und mit Proposition 3.6 auch in  $ET_2$ .
- Fall 2ii) (geerbter Fehler):  $T$  hat  $x_1 \dots x_i u$  mit  $u \in I_T^* = O^*$  ausgeführt und ebenso hat  $P'_2$  dieses Wort abgearbeitet. Durch dies hat  $P'_2$  einen Zustand in  $E_{P'_2}$  erreicht, da von  $T$  keine Fehler geerbt werden können. Es gilt dann  $\text{prune}(x_1 \dots x_i u) = \text{prune}(x_1 \dots x_i) \in PrET_{P'_2} \subseteq ET_{P'_2}$ . Da  $x_1 \dots x_i$  ein Präfix von  $w$  ist, führt in diesem Fall eine Verlängerung um lokale Aktionen von einem Präfix von  $w$  zu einem Fehler-Zustand. Da  $ET$  der Menge aller Verlängerungen von gekürzten Fehler-Traces entspricht, ist  $x_1 \dots x_i$  in  $ET_{P'_2}$  enthalten und somit ist mit Proposition 3.6 ein Präfix von  $w$  in  $ET_2$  enthalten.

Um die andere Inklusion zu beweisen, reicht es aufgrund der ersten Inklusion und der Definition von  $EL$  aus zu zeigen, dass  $L_1 \setminus ET_1 \subseteq EL_2$  gilt.

Es wird dafür ein beliebiges  $w \in L_1 \setminus ET_1$  gewählt und gezeigt, dass es in  $EL_2$  enthalten ist. Das  $w$  ist wegen der Propositionen 2.1 und 3.6 auch für eine as-Implementierung  $P'_1$  von  $P_1$  in  $L_{P'_1} \setminus ET_{P'_1}$  enthalten.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Da  $\varepsilon$  immer in  $EL_2$  muss hier nichts gezeigt werden.
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n$  mit  $n \geq 1$ ): Es wird ein Partner  $T$  wie folgt konstruiert ( $T$  entspricht dabei  $U$  aus Abbildung 3.2 bis auf die Benennung der Mengen):

- $T = \{p_0, p_1, \dots, p_n, p\},$
- $p_{0T} = p_0,$
- $\rightarrow_T = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p) \mid x \in I_T \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p, x, p) \mid x \in I_T\},$
- $E_T = \{p_n\}.$

Da  $p_{01} \xRightarrow{w}_{P'_1} p'$  gilt, kann man schließen, dass  $P'_1 \parallel T$  ein lokal erreichbaren geerbten Fehler hat. Es muss also auch eine as-Implementierung  $P'_2$  von  $P_2$  geben, für die  $P'_2 \parallel T$  einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand hat.

- Fall 2a) (neuer Fehler aufgrund von  $x_i \in O_T$  und  $p_{02} \xRightarrow{x_1 \dots x_{i-1}}_{P'_2} p'' \not\xrightarrow{x_i}_{P'_2}$ ): Es gilt  $x_1 \dots x_i \in MIT_{P'_2}$  und somit  $w \in EL_{P'_2}$ . Anzumerken ist, dass es nur auf diesem Weg Outputs von  $T$  möglich sind, deshalb gibt es keine anderen Outputs von  $T$ , die zu einem neuen Fehler führen können. Es gilt  $w \in EL_2$  wegen Proposition 3.6.
- Fall 2b) (neuer Fehler aufgrund von  $a \in O = I_T$ ): Der einzige Zustand, in dem  $T$  nicht alle Inputs erlaubt sind, ist  $p_n$ , der bereits ein Fehler-Zustand ist. Da dieser Zustand in  $P'_2 \parallel T$  erreichbar ist, besitzt der komponierte MEIO einen geerbten Fehler und es gilt  $w \in L_{P'_2} \subseteq EL_{P'_2}$ , wegen dem folgenden Fall 2c).
- Fall 2c) (geerbter Fehler von  $T$ ): Da  $p_n$  der einzige Fehler-Zustand in  $T$  ist und alle Aktionen synchronisiert sind, ist dies nur möglich, wenn  $p_{02} \xRightarrow{x_1 \dots x_n}_{P'_2}$  gilt. In diesem Fall gilt  $w \in L_{P'_2} \subseteq EL_{P'_2}$ . Daraus folgt mit Proposition 3.6  $w \in EL_2$ .
- Fall 2d) (geerbter Fehler von  $P'_2$ ): Es gilt dann  $p_{02} \xRightarrow{x_1 \dots x_n}_{P'_2} p' \in E_{P'_2}$  für  $i \geq 0$  und  $u \in O^*$ . Somit ist  $x_1 \dots x_i u \in StET_{P'_2}$  und damit  $\text{prune}(x_1 \dots x_i u) = \text{prune}(x_1 \dots x_i) \in PrET_{P'_2} \subseteq EL_{P'_2}$ . Somit gilt mit Hilfe von Proposition 3.6  $w \in EL_{P'_2} \subseteq EL_2$ .

□

**Satz 3.14.** Falls  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  gilt folgt draus auch, dass  $P_1$   $P_2$  verfeinert.

*Beweis.* Nach Definition gilt, genau dann wenn  $\varepsilon \in ET(P)$ , ist ein Fehler-Zustand lokal erreichbar in  $P$ .  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  impliziert, dass  $\varepsilon \in ET_2$  gilt, wenn  $\varepsilon \in ET_1$ . Somit ist ein Fehler-Zustand in  $P_1$  nur dann lokal erreichbar, wenn dieser auch in  $P_2$  lokal erreichbar ist. Aufgrund von Proposition 3.6 gibt es dann auch entsprechende as-Implementierungen  $P'_1$  und  $P'_2$  für  $P_1$  bzw.  $P_2$ , die ebenfalls Fehler-Zustände lokal erreichen können, wenn dies in  $P_1$  bzw.  $P_2$  möglich ist. Für einen entsprechenden Test  $T$  gilt dann auch, dass  $P'_j \| T$  für  $j \in \{1, 2\}$  einen lokal erreichbaren Fehler hat, wenn  $P'_j$  einen solchen hat. Falls also  $P_1$  einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand enthält, dann zeigt sich dies Verhalten auch in einer as-Implementierung und auch in der Parallelkomposition der as-Implementierung mit einem Test  $T$ . Aus einem lokal erreichbaren Fehler in  $P_1$  folgt auch ein lokal erreichbarer Fehler-Zustand in  $P_2$  und somit auch ein lokal erreichbarer Fehler-Zustand in der Parallelkomposition einer as-Implementierung von  $P_2$  mit einem Test  $T$ . Aus  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  folgt also die Implikation  $\neg P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow \neg P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$  für alle Test  $T$ . Wenn man die Negationen entfernt, ergibt sich für alle Tests  $T$ :  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$ . Dies entspricht der Definition von  $P_1$  verfeinert  $P_2$ .  $\square$

Auch die in diesem Abschnitt gezeigten Folgerungen schließen sich zu einem Ring. Dies ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

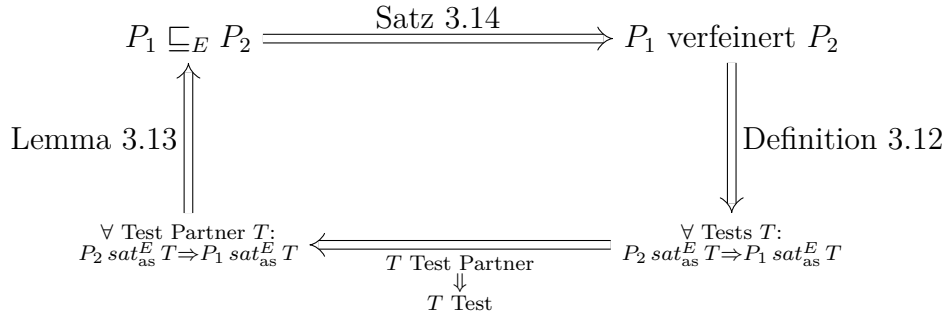


Abbildung 3.4: Folgerungskette der Testing-Verfeinerung und Fehler-Relation

## 4 Verfeinerungen für Kommunikationsfehler- und Ruhe-Freiheit

In diesem Kapitel wird die Menge der betrachteten Zustandsmengen von den Kommunikations-basierten Fehlern im letzten Kapitel erweitert um Ruhe-Zustände.

Zustände, die keine must-Outputs ohne einen Input ausführen können, werden als in einer Art Verklemmung angesehen, da sie ohne Zutun von Außen den Zustand nicht mehr verlassen können, falls ein möglicherweise vorhandener may-Output nicht implementiert wird. So ein Zustand hat also keine must-Transitions-Möglichkeiten für einen Output. Falls dieser Zustand die Möglichkeit für eine interne Aktion via einer must-Transition hat, darf durch die  $\tau$ s niemals ein Zustand erreicht werden, von dem aus ein Output in Implementierungen sicher gestellt wird. Ein Zustand, der keine Outputs und  $\tau$ s via must-Transitionen ausführen kann, ist also ein Deadlock-Zustand, in denen das System nichts mehr tun können muss ohne einen Input. Wenn man eine Erweiterung um  $\tau$ s zu Zuständen ohne must-Outputs zulässt, hat man zusätzlich noch Verklemmungen der Art Livelock, da diese Zustände möglicherweise beliebig viele interne Aktionen ausführen können, jedoch nie aus eigener Kraft einen wirklichen Fortschritt in Form eines Outputs bewirken können müssen. Die Menge der Zustände, die sich in einer Verklemmung befinden, würde also durch  $\{p \in P \mid \forall a \in O : p \not\stackrel{a}{\rightarrow}_P\}$  beschrieben werden. Somit wären dies alle Zustände, die keine Möglichkeit haben ohne einen Input von Außen oder eine implementierte may-Output-Transition je wieder einen Output machen zu können. Falls man diese Definition verwenden würde, müsste man immer alle Zustände betrachten, die durch  $\tau$ s erreichbar sind. Dies würde einige Betrachtungen deutlich aufwendiger machen und soll deshalb hier nicht behandelt werden. Die Definition für die betrachteten Verklemmungen, hier Ruhe genannt, beschränkt sich auf Zustände, die keine Outputs und  $\tau$ s via must-Transitionen ausführen können.

**Definition 4.1 (*Ruhe*).** Ein Ruhe-Zustand ist ein Zustand in einem MEIO  $P$ , der keine Outputs und kein  $\tau$  zulässt via must-Transitionen.

Somit ist die Menge der Ruhe-Zustände in einem MEIO  $P$  wie folgt formal definiert:  $Qui(P) := \{p \in P \mid \forall \alpha \in (O \cup \{\tau\}) : p \not\stackrel{\alpha}{\rightarrow}_P\}$ .

Für die Erreichbarkeit wird wie im letzten Kapitel ein optimistischer Anzahl der lokalen Erreichbarkeit für die Fehler-Zustände verwendet. Ruhe ist kein unabwendbare „Fehler-Art“, sondern kann durch einen Input repariert werden oder im Fall von vorhandenen

may-Output-Transitionen oder may- $\tau$ -Transitionen, durch eine Implementierung dieses Outputs oder des  $\tau$ s. Daraus ergibt sich, dass Ruhe im Vergleich zu den Fehlern aus dem letzten Kapitel als weniger „schlimmer Fehler“ anzusehen ist. Somit ist ein Ruhe-Zustand ebenso wie ein Fehler-Zustand erreichbar, sobald er durch Outputs und  $\tau$ s erreicht werden kann, jedoch ist nicht jede beliebige Fortsetzung eines Traces, das durch lokale Aktionen zu einem Ruhe-Zustand führt ein Ruhe-Trace.

**Definition 4.2 (Test und Verfeinerung für Ruhe).** *Ein Test  $T$  ist eine Implementierung. Ein MEIO  $P$  as-erfüllt einen Ruhe-Test  $T$ , falls  $S \parallel T$  fehler- und ruhe-frei ist für alle  $S \in \text{as-impl}(P)$ . Es wird dann  $P \text{ sat}_{\text{as}}^{\text{Qui}} T$  geschrieben. Ein MEIO  $P$  verfeinert  $P'$ , falls für alle Tests  $T$ :  $P' \text{ sat}_{\text{as}}^{\text{Qui}} T \Rightarrow P \text{ sat}_{\text{as}}^{\text{Qui}} T$ .*

Um eine genauere Auseinandersetzung mit den Präkongruenzen zu ermöglichen, benötigt man wie im letzten Kapitel die Definition von Traces auf der Struktur. Dadurch erhält man die Möglichkeit die grösste Präkongruenz charakterisieren zu können. Wie bereits oben erwähnt, ist Ruhe ein reparierbares „Fehlverhalten“ im Gegensatz zu Fehlern. Es genügt deshalb für Ruhe die strikten Traces ohne Kürzung zu betrachten.

**Definition 4.3 (Ruhe-Traces).** *Sei  $P$  ein MEIO und definiere:*

- strikte Ruhe-Traces:  $\text{StQT}(P) := \{w \in \Sigma^* \mid p_0 \xRightarrow{w}_P p \in \text{Qui}(P)\}.$

**Proposition 4.4 (Ruhe-Traces und Implementierungen).** *Für ein MEIO  $P$  gilt für die strikte Ruhe-Traces:  $\text{StQT}(P) \subseteq \{w \in \Sigma^* \mid \exists P' \in \text{as-impl}(P) : p'_0 \xRightarrow{w}_{P'} p' \in \text{Qui}(P')\} = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} \text{StQT}(P').$*

*Beweis.* Analog zu den Propositionen 2.1 und 3.4 ist die Inklusion am Besten mit einer as-Implementierung zu zeigen und der entsprechenden as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$ . Falls  $\varepsilon$  zu einem Ruhe-Zustand führt in  $P$ , muss man zwei as-Implementierungen betrachten, ansonsten genügt es eine für alle  $w$  aus  $\text{StQT}(P)$  anzugeben.

Die as-Implementierung  $P'$  für den Fall  $\varepsilon \in \text{StQT}(P)$  implementiert alle must-Transitionen, keine may-Transitionen und keine Fehler-Zustände von  $P$  und hat die Identitäts-Relation als starke as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$ . Für alle  $a \in \Sigma$  gilt somit, wenn in  $P$  für einen Zustand  $p$   $p \xrightarrow{a}$  galt auch in  $P'$   $p' \xrightarrow{a}$  für den Zustand, der mit  $p$  in Relation steht. Der Startzustand von  $P'$  ist mit  $\varepsilon$  erreichbar und auch ruhig. Es gilt also  $\varepsilon \in \text{StQT}(P')$ . Der 2. Punkt der Definition 1.3 ist für die Identitäts-Relation als as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  erfüllt, da alle must-Transitionen aus  $P$  entsprechend in  $P'$  umgesetzt wurden. Alle must-Transitionen in  $P$  müssen zugrundeliegende may-Transitionen haben, somit gilt auch 3. von 1.3. Der 1. Punkt der Definition ist auch erfüllt, da  $E_{P'} = \emptyset$  gilt, wenn keine Fehler-Zustände implementiert werden.

Für alle  $w \neq \varepsilon$  mit  $w \in \text{StQT}(P)$  kann  $P'$  als die folgende as-Implementierung gewählt werden:

- $P' = \{q \mid p \in P\} \cup \{q' \mid p \in P\},$



- $p'_0 = q_0$ ,
- $I_{P'} = I_P$  und  $O_{P'} = O_P$ ,
- $\longrightarrow_{P'} = \dashrightarrow_{P'} = \left\{ (q_0, \alpha, q_j) \mid p_0 \dashrightarrow^\alpha p_j \right\}$   
 $\cup \left\{ (q_0, \alpha, q'_j) \mid p_0 \dashrightarrow^\alpha p_j \right\}$   
 $\cup \left\{ (q_j, \alpha, q_k) \mid p_j \xrightarrow{\alpha} p_k \right\}$   
 $\cup \left\{ (q'_j, \alpha, q'_k) \mid p_j \xrightarrow{\alpha} p_k \right\}$   
 $\cup \left\{ (q'_j, \alpha, q_k) \mid j \neq 0, p_j \dashrightarrow^\alpha p_k, p_j \not\xrightarrow{\alpha} p_k \right\}$   
 $\cup \left\{ (q'_j, \alpha, q'_k) \mid j \neq 0, p_j \dashrightarrow^\alpha p_k, p_j \not\xrightarrow{\alpha} p_k \right\},$
- $E_{P'} = \emptyset$ .

Als as-Verfeinerungs-Relation zwischen  $P$  und  $P'$  wird die Relation  $\mathcal{R} = \{(q_j, p_j) \mid p_j \in P\} \cup \{(q'_j, p_j) \mid p_j \in P\}$  verwendet. Es werden in  $P'$  für die ungestrichenen Zustände  $q$  nur die must-Transitionen und für die gestrichenen Zustände  $q'$  werden die must- und may-Transitionen implementiert. Die must-Transitionen werden nur zu den Zuständen der „gleichen Sorte“ umgesetzt, wohingegen die may-Transitionen, zu denen es keine entsprechende must-Transition in  $P$  gibt, von den Zuständen  $q'$  zu dem entsprechenden ungestrichenen und gestrichenen Zustand implementiert wird. Da die Menge der Fehler-Zustände leer ist, gilt 1.3 1. für  $\mathcal{R}$ . Die must-Transitionen werden für die ungestrichenen und gestrichenen Zustände umgesetzt, dies erfüllt zusammen mit  $\mathcal{R}$  die Definition 1.3 2. Ebenso wird der dritte Punkt dieser Definition erfüllt, da sowohl die gestrichenen wie auch die ungestrichenen Zustände mit den entsprechenden Zuständen aus  $P$  in der Relation  $\mathcal{R}$  stehen.  $\mathcal{R}$  ist also eine starke alternierende Simulations-Relation auf  $P'$  und  $P$ . Falls ein Zustand  $p_j$  in  $P$  ruhig war, ist es auch der entsprechenden Zustand  $q_j$  in  $P'$ , da für  $q_j$  alle ausgehenden must-Transitionen von  $p_j$  implementiert wurden, aber keine einzige may-Transition, die keine der must-Transitionen entspricht. Wenn also für  $p_j$  keine Outputs und kein  $\tau$  möglich waren via must-Transitionen, dann ist es dies auch für  $q_j$  nicht.  $q_j$  ist in  $P'$  mit den selben Traces erreichbar wie  $p_j$  in  $P$ , da jeder ungestrichene und gestrichene Zustand in  $P'$  die selben eingehenden Transitionen hat wie der entsprechende Zustand in  $P$ . Falls der Trace zu  $p_j$  may-Transitionen ohne entsprechende must-Transitionen enthält, kann der entsprechende Trace in  $P'$  ausgeführt werden, in dem von  $q_0$  aus der Trace über die gestrichenen Zustände genommen wird bis zur letzten Transition, die zu einem ungestrichenen Zuständen führt in dem auszuführenden Wort. Ab da hat der Trace in  $P$  nur must-Transitionen genommen und kann somit in den ungestrichenen Zuständen in  $P'$  nachgefolgt werden. Falls der Trace in  $P$  insgesamt nur aus must-Transitionen bestanden hat, ist direkt von  $q_0$  aus der Weg über ungestrichene Zustände zu  $q_j$  möglich. Es gilt also  $StQT(P) \setminus \{\varepsilon\} = StQT(P') \setminus \{\varepsilon\}$ .  $\square$

Für  $ET$  und  $EL$  gelten die Definitionen aus dem letzten Kapitel. Es wird nur für Ruhe eine neue Semantik definiert.

**Definition 4.5 (*Ruhe-Semantik*).** Sei  $P$  ein MEIO.

- Die Menge der fehler-gefluteten Ruhe-Traces von  $P$  ist  $QET(P) := StQT(P) \cup ET(P)$ .

Für zwei MEIOs  $P_1, P_2$  mit der gleichen Signatur wird  $P_1 \sqsubseteq_{Qui} P_2$  geschrieben, wenn  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  und  $QET_1 \subseteq QET_2$  gilt.

**Proposition 4.6 (*Ruhe-Semantik und Implementierungen*).** Für die Menge der fehler-gefluteten Ruhe-Traces von  $P$  gilt  $QET(P) = \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} QET(P')$ .

*Beweis.*

$\subseteq$ :

$$\begin{aligned}
 QET(P) &\stackrel{4.5}{=} StQT(P) \cup ET(P) \\
 &\stackrel{4.4}{\subseteq} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} StET(P') \right) \cup ET(P) \\
 &\stackrel{3.6}{=} \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} StET(P') \right) \cup \left( \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} ET(P') \right) \\
 &= \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} StQT(P') \cup ET(P') \\
 &\stackrel{4.5}{=} \bigcup_{P' \in \text{as-impl}(P)} QET(P').
 \end{aligned}$$

$\supseteq$ :

Es wird hier für ein  $w \in QET(P')$  einer beliebigen as-Implementierung  $P'$  von  $P$  gezeigt, dass das Wort  $w$  auch in  $QET(P)$  enthalten ist. Es kann danach unterschieden werden, ob  $w$  aus  $StQT(P') \setminus ET(P')$  stammt oder aus  $ET(P')$ . Falls  $w \in ET(P')$  gilt, folgt mit Proposition 3.6 bereits, dass  $w \in ET(P) \subseteq QET(P)$  gilt. Somit wird für den Rest des Beweises davon ausgegangen, dass  $w \in StQT(P') \setminus ET(P')$  ist.  $w$  führt in  $P'$  also nur zu einem ruhigen Zustand und hat nichts mit Fehler-Zuständen in  $P'$  zu tun. Da es eine as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  geben muss, die beweist, dass  $P'$   $P$  as-verfeinert, muss es ein Präfix von  $w$  geben, dass auch in  $P$  ausführbar ist. Falls  $w$  nicht vollständig ausführbar ist in  $P$ , muss auf dem Weg, auf dem das Präfix von  $w$  ausgeführt wird ein Zustand liegen, der ein Fehler-Zustand ist. Es gilt dann  $w \in ET(P) \subseteq QET(P)$ . Falls jedoch  $w$  in  $P$  ausführbar ist ohne einen Fehler-Zustand zu erreichen, muss der dadurch erreichte Zustand  $p$  mit dem Zustand  $p'$ , der in  $P'$  durch  $w$  erreicht wird, in der starken as-Verfeinerungs-Relation  $\mathcal{R}$  stehen.  $p'$  ist ruhig, nach Voraussetzung, dass  $w \in StQT(P')$  enthalten ist. Es gilt also für alle  $\omega \in O \cup \{\tau\}$   $p' \not\rightarrow \omega$ . Da  $(p', p) \in \mathcal{R}$  in Relation stehen und beide Zustände keine Fehler-Zustände sind, muss auch  $p \not\rightarrow \omega$ .

für alle  $\omega \in O \cup \{\tau\}$  gelten, da sonst 1.3 2. verletzt würde. Es gilt also in diesem Fall  $w \in StQT(P) \subseteq QET(P)$ .  $\square$

**Lemma 4.7 (Ruhe-Zustände unter Parallelkomposition).**

1. Ein Zustand  $(p_1, p_2)$  aus der Parallelkomposition  $P_{12}$  ist ruhig, wenn es auch die Zustände  $p_1$  und  $p_2$  in  $P_1$  bzw.  $P_2$  sind.
2. Wenn der Zustand  $(p_1, p_2)$  ruhig ist und nicht in  $E_{12}$  enthalten ist, dann sind auch die auf die Teilsysteme projizierten Zustände  $p_1$  und  $p_2$  ruhig.

*Beweis.*

1. Da  $p_1 \in Qui_1$  und  $p_2 \in Qui_2$  gilt, haben diese beiden Zustände jeweils höchstens die Möglichkeit für Input-Transitionen oder Output- und  $\tau$ -may-Transitionen, jedoch keine Möglichkeit für Outputs oder  $\tau$ s als must-Transitionen.  
Angenommen der Zustand, der durch die Parallelkomposition aus den Zuständen  $p_1$  und  $p_2$  entsteht, ist nicht ruhig, d.h. er hat eine ausgehende must-Transition für einen Output oder ein  $\tau$ .
  - Fall 1  $((p_1, p_2) \xrightarrow{\tau}_{12})$ : Ein  $\tau$  ist eine interne Aktion und kann in der Parallelkomposition nicht durch das Verbergen von Aktionen bei der Synchronisation entstehen. Ein  $\tau$  in der Parallelkomposition ist also auch nur möglich, wenn dies bereits als must-Transition in einer Komponente möglich war für einen der Zustände, aus denen  $(p_1, p_2)$  zusammensetzt ist. Jedoch verbietet die Voraussetzung, dass  $p_1$  oder  $p_2$  eine ausgehende  $\tau$  must-Transition haben, deshalb kann auch  $(p_1, p_2)$  keine solche Transition besitzen.
  - Fall 2  $((p_1, p_2) \xrightarrow{a}_{12} \text{ mit } a \in O_{12} \setminus \text{Synch}(P_1, P_2))$ : Da es sich bei  $a$  um einen Output handelt, der nicht in  $\text{Synch}(P_1, P_2)$  enthalten ist, kann dieser nicht aus der Synchronisation von zwei Aktionen entstanden sein, sondern muss bereits für  $P_1$  oder  $P_2$  als must-Transition ausführbar gewesen sein. Es gilt also oBdA  $p_1 \xrightarrow{a}_1$  mit  $a \in O_1$ . Dies ist jedoch aufgrund der Voraussetzung nicht möglich. Somit kann die Parallelkomposition diese Transition für  $(p_1, p_2)$  ebenfalls nicht als must-Transition enthalten.
  - Fall 3  $((p_1, p_2) \xrightarrow{a}_{12} \text{ mit } a \in O_{12} \cap \text{Synch}(P_1, P_2))$ : Der Output  $a$  ist in diesem Fall durch Synchronisation von einem Output mit einem Input entstanden. OBdA gilt  $a \in O_1 \cap I_2$ . Für die einzelnen Systeme muss also gelten, dass  $p_1 \xrightarrow{a}_1$  und  $p_2 \xrightarrow{a}_2$ . Die Transition für das System  $P_1$  ist jedoch in der Voraussetzung ausgeschlossen worden. Somit ist es nicht möglich, dass  $P_{12}$  diese in diesem Fall angenommene must-Transition für den Zustand  $(p_1, p_2)$  ausführen kann.

Da alle diese Fälle zu einem Widerspruch mit der Voraussetzung führen folgt, dass bereits die Annahme, dass der Zustand  $(p_1, p_2)$  nicht ruhig ist, falsch war. Es gilt also, dass aus  $p_j \in Qui_j$  für  $j \in \{1, 2\}$   $(p_1, p_2) \in Qui_{12}$  folgt.

2. Es gilt  $(p_1, p_2) \in Qui_{12} \setminus E_{12}$ , somit hat dieser Zustand allenfalls die Möglichkeit für must-Transitionen, die mit Inputs beschriftet sind.

Angenommen  $p_1 \notin Qui_1$ , dann ist für  $p_1$  entweder eine  $\tau$ -must-Transition oder eine Output-must-Transition möglich.

- Fall 1 ( $p_1 \xrightarrow{\tau}_1$ ): Da die Transition für  $P_1$  möglich ist, hat auch  $P_{12}$  die Möglichkeit für eine  $\tau$ -must-Transition. Dies ist jedoch durch die Voraussetzung verboten und somit kann dieser Fall nicht eintreten.
- Fall 2 ( $p_1 \xrightarrow{a}_1$  mit  $a \in O_1 \setminus \text{Synch}(P_1, P_2)$ ): Da es sich bei  $a$  um einen must-Output handelt, der nicht zu synchronisieren ist, wird dieser einfach in die Parallelkomposition übernommen. Es müsste also  $(p_1, p_2) \xrightarrow{a}_{12}$  mit  $a \in O_{12}$  gelten, was jedoch verboten ist. Somit kann die Transition für  $P_1$  in diesem Fall nicht möglich sein.
- Fall 3 ( $p_1 \xrightarrow{a}_1$  mit  $a \in O_1 \cap \text{Synch}(P_1, P_2)$  und  $p_2 \xrightarrow{a}_2$ ): In diesem Fall ist die Synchronisation des Outputs  $a$  von  $P_1$  mit dem Input  $a$  von  $P_2$  möglich, so dass in der Parallelkomposition der Output  $a$  als must-Transition für  $(p_1, p_2)$  entsteht. Diese must-Transition ist jedoch für  $P_{12}$  nach Voraussetzung nicht erlaubt. Es folgt also auch, dass dieser Fall nicht eintreten kann.
- Fall 4 ( $p_1 \xrightarrow{a}_1$  mit  $a \in O_1 \cap \text{Synch}(P_1, P_2)$  und  $p_2 \not\xrightarrow{a}_2$ ): Da  $P_2$  die  $a$  Transition nicht als must-Transition enthält, handelt es sich hier um einen neuen Fehler. Das  $a$  kann für  $P_2$  kein Output sein, da sonst  $P_1$  und  $P_2$  nicht komponierbar wäre. Der neue Fehler kann dadurch entstehen, dass die Synchronisation des Outputs  $a$  von  $P_1$  mit dem Input  $a$  von  $P_2$  an dieser Stelle nicht möglich ist, oder da der Input  $a$  für  $p_2$  nur als may-Transition vorliegt und somit die Gefahr besteht, dass dieser in einer Implementierung nicht vorhanden ist. Im zweiten Fall synchronisieren die beiden Transitionen zu einer  $a$  Output-may-Transition, die in  $P_{12}$  zulässig wäre. Jedoch wird der Zustand  $(p_1, p_2)$  in beiden Fällen in die Menge  $E_{12}$  der Parallelkomposition eingefügt (Definition 1.2). Dies wurde in der Voraussetzung für den Zustand ausgeschlossen und dieser Fall ist somit nicht möglich.

Alle aufgeführten Fälle führen zu einem Widerspruch mit der Voraussetzung, somit folgt, dass die Annahme bereits falsch war und  $p_1 \in Qui_1$  gelten muss. Analog kann für  $p_2$  argumentiert werden, so dass dann auch  $p_2 \in Qui_2$  folgt.

□

In dem folgenden Satz sind die Punkte 1. und 3. nur zur Vollständigkeit aufgeführt. Sie entsprechen Punkt 1. und 2. aus Satz 3.7.

**Satz 4.8 (Kommunikationsfehler- und Ruhe-Semantik für Parallelkompositionen).** Für zwei komponierbare MEIOs  $P_1, P_2$  und ihre Komposition  $P_{12}$  gilt:

1.  $ET_{12} = \text{cont}(\text{prune}((ET_1 \parallel EL_2) \cup (EL_1 \parallel ET_2)))$ ,

$$2. QET_{12} = (QET_1 \| QET_2) \cup ET_{12},$$

$$3. EL_{12} = (EL_1 \| EL_2) \cup ET_{12}.$$

*Beweis.* Es wird nur der 2. Punkt beweisen.

„ $\subseteq$ “:

Hier muss unterschieden werden, ob ein  $w \in StQT_{12} \setminus ET_{12}$  oder ein  $w \in ET_{12}$  betrachtet wird. Im zweiten Fall ist das  $w$  offensichtlich in der rechten Seite enthalten. Somit wird ab jetzt ein  $w \in StQT_{12} \setminus ET_{12}$  betrachtet und es wird versucht dessen Zugehörigkeit zur rechten Menge zu zeigen. Aufgrund von Definition 4.3 weiß man, dass  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{w}_{12} (p_1, p_2)$  gilt mit  $(p_1, p_2) \in Qui_{12} \setminus E_{12}$ . Durch Projektion erhält man  $p_{01} \xRightarrow{w_1}_1 p_1$  und  $p_{02} \xRightarrow{w_2}_2 p_2$  mit  $w \in w_1 \| w_2$ . Aus  $(p_1, p_2) \in Qui_{12} \setminus E_{12}$  kann mit dem zweiten Punkt von Lemma 4.7 gefolgert werden, dass bereits  $q_1 \in Qui_1$  und  $q_2 \in Qui_2$  gilt. Somit gilt  $w_1 \in StQT_1 \subseteq QET_1$  und  $w_2 \in StQT_2 \subseteq QET_2$ . Daraus folgt dann  $w \in QET_1 \| QET_2$  und somit ist  $w$  in der rechten Seite der Gleichung enthalten.

„ $\supseteq$ “:

Es muss wieder danach unterscheiden werden aus welcher Menge das betrachtete Element stammt. Falls  $w \in ET_{12}$  gilt, so kann die Zugehörigkeit zur linken Seite direkt gefolgert werden. Somit wird für den weiteren Beweis dieser Inklusionsrichtung ein Element  $w \in QET_1 \| QET_2$  betrachtet und gezeigt, dass es in der linken Menge enthalten ist. Da  $QET_i = StQT_i \cup ET_i$  gilt, existieren für  $w_1$  und  $w_2$  mit  $w \in w_1 \| w_2$  unterschiedliche Möglichkeiten:

- Fall 1 ( $w_1 \in ET_1 \vee w_2 \in ET_2$ ): OBdA gilt  $w_1 \in ET_1$ . Nun kann  $w_2 \in StQT_2 \subseteq L_2$  oder  $w_2 \in ET_2$  gelten und somit ist auf jeden Fall  $w_2$  in  $EL_2$  enthalten. Daraus kann dann mit dem ersten Punkt von Satz 3.7 gefolgert werden, dass  $w \in ET_{12}$  gilt und damit ist  $w$  in der linken Seite der Gleichung enthalten.
- Fall 2 ( $w_1 \in StQT_1 \setminus ET_1 \wedge w_2 \in StQT_2 \setminus ET_2$ ): Es gilt in diesem Fall  $p_{01} \xRightarrow{w_1}_1 p_1 \in Qui_1$  und  $p_{02} \xRightarrow{w_2}_2 p_2 \in Qui_2$ . Da  $p_1$  und  $p_2$  in der jeweiligen Ruhe-Menge enthalten sind, ist auch der Zustand, der aus ihnen zusammengesetzt ist, in der Parallelkomposition ruhig, wie bereits im ersten Punkt von Lemma 4.7 gezeigt. Es gilt also für die Komposition  $(p_{01}, p_{02}) \xRightarrow{w}_{12} (p_1, p_2) \in Qui_{12}$  und dadurch ist  $w$  in der linken Seite der Gleichung enthalten, da  $w \in StQT_{12} \subseteq QET_{12}$  gilt.

□

**Korollar 4.9 (Ruhe-Präkongruenz).** Die Relation  $\sqsubseteq_{Qui}$  ist eine Präkongruenz bezüglich  $\cdot \| \cdot$ .

*Beweis.* Es muss gezeigt werden: Wenn  $P_1 \sqsubseteq_{Qui} P_2$  gilt, so auch  $P_{31} \sqsubseteq_{Qui} P_{32}$  für jedes komponierbare System  $P_3$ . D.h. es ist zu zeigen, dass aus  $P_1 \sqsubseteq_E P_2$  und  $QET_1 \subseteq QET_2$  sowohl  $P_{31} \sqsubseteq_E P_{32}$  als auch  $QET_{31} \subseteq QET_{32}$  folgt. Dies ergibt sich, wie im Beweis zu Korollar 3.8, aus der Monotonie von  $\cdot \| \cdot$  auf Sprachen wie folgt:

- Korollar 3.8  
und  

$$P_1 \sqsubseteq_E P_2$$

$$P_1 \sqsubseteq_E P_2$$
- $P_{31} \sqsubseteq_E P_{32},$
  - $QET_{31} \stackrel{4.8}{=} (QET_3 \parallel QET_1) \cup ET_{31}$   

$$ET_{31} \subseteq ET_{32}$$
und  

$$QET_1 \subseteq QET_2$$

$$(QET_3 \parallel QET_2) \cup ET_{32}$$

$$\stackrel{4.8}{=} QET_{32}.$$

□

Im nächsten Lemma soll eine Verfeinerung bezüglich guter Kommunikation mit Partnern betrachtet werden. Die gute Kommunikation stützt sich dabei auf die Definition von Tests und der daraus resultierenden Verfeinerung in 4.2.

**Lemma 4.10 (Testing-Verfeinerung mit Ruhe).** *Gegeben sind zwei MEIOs  $P_1$  und  $P_2$  mit der gleichen Signatur. Wenn für alle Tests  $T$ , die Partner von  $P_1$  bzw.  $P_2$  sind,  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^{Qui} T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^{Qui} T$  gilt, dann folgt daraus die Gültigkeit von  $P_1 \sqsubseteq_{Qui} P_2$ .*

*Beweis.* Da  $P_1$  und  $P_2$  die gleiche Signatur haben, wird  $I := I_1 = I_2$  und  $O := O_1 = O_2$  definiert. Für jeden Test Partner  $T$  gilt  $I_T = O$  und  $O_T = I$ .

Um zu zeigen, dass die Relation  $P_1 \sqsubseteq_{Qui} P_2$  gilt, müssen die folgenden Punkte nachgewiesen werden:

- $P_1 \sqsubseteq_E P_2,$
- $QET_1 \subseteq QET_2.$

In Lemma 3.13 wurde bereits etwas Ähnliches gezeigt, jedoch wurde dort als Voraussetzung  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^E T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^E T$  für alle Test Partner  $T$  verwendet und hier dieselbe Aussage mit der Test Erfüllung für Ruhe. Die hier verwendeten Tests sagen nichts darüber aus, welche Art von „fehlerhaftem Zustand“ enthalten ist. Die Aussage des Lemmas 3.13 kann hier also nicht verwendet werden. Aus der Erreichbarkeit eines Fehler-Zustandes in der Parallelkomposition einer as-Implementierung von  $P_1$  mit  $T$  lässt sich nur schließen, dass  $P_2$  den Test  $T$  ebenfalls nicht as-erfüllt. Dies kann aber aufgrund einer as-Implementierung von  $P_2$  sein, die in Parallelkomposition mit  $T$  einen Fehler- oder Ruhe-Zustand erreicht. Analoges gilt auch für die Erreichbarkeit eines Ruhe-Zustandes in der Komposition einer as-Implementierung von  $P_1$  mit einem Test  $T$ .

Es muss also für den ersten Punkt noch folgendes nachgewiesen werden:

- $ET_1 \subseteq ET_2,$
- $EL_1 \subseteq EL_2.$

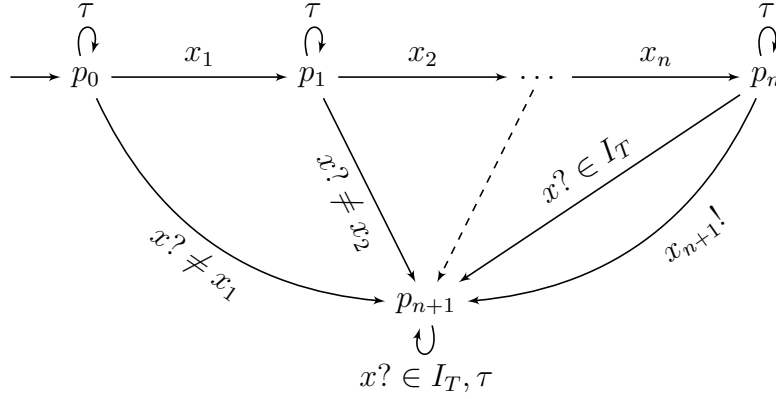
Es wird nun damit begonnen, den ersten Unterpunkt des ersten Beweispunktes zu zeigen, d.h. es wird unter der Voraussetzung  $P_2 \text{ sat}_{\text{as}}^{Qui} T \Rightarrow P_1 \text{ sat}_{\text{as}}^{Qui} T$  gezeigt, dass  $ET_1 \subseteq ET_2$  gilt. Da beide  $ET$ -Mengen unter cont abgeschlossen sind, reicht es ein präfix-minimales Element  $w \in ET_1$  zu betrachten und zu zeigen, dass dieses  $w$  oder eines seiner Präfixe

in  $ET_2$  enthalten ist.  $w$  muss ebenfalls in einer as-Implementierung  $P'_1$  von  $P_1$  ebenfalls als präfix-minimales Element in  $ET_{P'_1}$  enthalten sein, wegen Proposition 3.6.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Es handelt sich um einen lokal erreichbaren Fehler-Zustand in  $P'_1$ . Für  $T$  wird ein Transitionssystem verwendet, das nur aus dem Startzustand, einer must-Schleife für alle Inputs  $x \in I_U$  und einer must-Schlinge für  $\tau$  besteht. Somit kann  $P'_1$  die im Prinzip gleichen Fehler-Zustände lokal erreichen wie  $P'_1 \parallel T$ . Es gibt also einen lokal erreichbaren Zustand von  $P'_1 \parallel T$ , der in  $E_{P'_1 \parallel T}$  enthalten ist. Somit erfüllt  $P_1$  nicht alle Tests  $T$  und es muss somit auch mindestens eine as-Implementierung  $P'_2$  von  $P_2$  geben, die den Test  $T$  ebenfalls nicht erfüllt. Da eine Implementierung den Test  $T$  erfüllt, wenn die Parallelkomposition der Implementierung mit dem Test fehler- und ruhe-frei ist, kann die nicht Erfüllung eines Testes sowohl an einem Fehler- wie auch einem Ruhe-Zustand liegen. Da die Parallelkomposition von  $P'_2$  und  $T$  geschlossen ist, gibt es nur lokale Aktionen und der „fehlerhafte Zustand“ muss lokal erreichbar sein in  $P'_2 \parallel T$ . Bei dem „fehlerhaften Zustand“ kann es sich nur um einen lokal erreichbaren Fehler handeln, da es in der Komposition mit  $T$  keine Ruhe-Zustände geben kann. Da  $T$  keinen Fehler-Zustand und auch keine fehlenden Input-Möglichkeiten enthält, kann der Fehler nur von  $P'_2$  geerbt sein. Somit muss in  $P'_2$  ein Fehler-Zustand lokal erreichbar sein, da  $T$  keine synchronisation von Inputs  $I$  mit Output  $O_T$  zulässt und es auch keine unsynchronisierten sichtbaren Aktionen in der Parallelkomposition gibt. Es gilt also  $\varepsilon \in PrET_{P'_2} \subseteq ET_{P'_2}$  und mit Proposition 3.6 auch  $\varepsilon \in ET_2$ .
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n x_{n+1} \in \Sigma^+$  mit  $n \geq 0$  und  $x_{n+1} \in I$ ): Es wird der folgende Partner  $T$  betrachtet (siehe auch Abbildung 4.1):

- $T = \{p_0, p_1, \dots, p_{n+1}\}$ ,
- $p_0 T = p_0$ ,
- $\rightarrow_T = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p_{n+1}) \mid x \in I_T \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p_{n+1}, x, p_{n+1}) \mid x \in I_T\}$   
 $\cup \{(p_j, \tau, p_j) \mid 0 \leq j \leq n+1\}$ ,
- $E_T = \emptyset$ .

Die Menge der Ruhe-Zustände des hier betrachteten  $T$ s ist leer. Da im Vergleich zum Transitionssystem in Abbildung 3.1 nur die  $\tau$ -Schlingen ergänzt wurden und die Umbenennung der Mengen, ändert sich nichts an den Fällen 2a) und 2b) aus dem Beweis der selben Inklusion von Lemma 3.13. Die Begründungen, wieso in den beiden Fällen  $\varepsilon \in PrET(P'_1 \parallel T)$  gilt, bleibt also analog zum Beweis des ersten Punktes des Lemmas aus dem vorangegangnen Kapitel. Durch die must- $\tau$ -Schlingen wurde, genau wie im letzten Fall erreicht, das in einer Parallelkomposition mit  $T$  keine Ruhe-Zustände möglich sind. Es kann also auch hier aus der lokalen Erreichbarkeit eines Fehler in  $P'_1 \parallel T$  auf die lokale Erreichbarkeit eines


 Abbildung 4.1:  $x? \neq x_j$  steht für alle  $x \in I_T \setminus \{x_j\}$ 

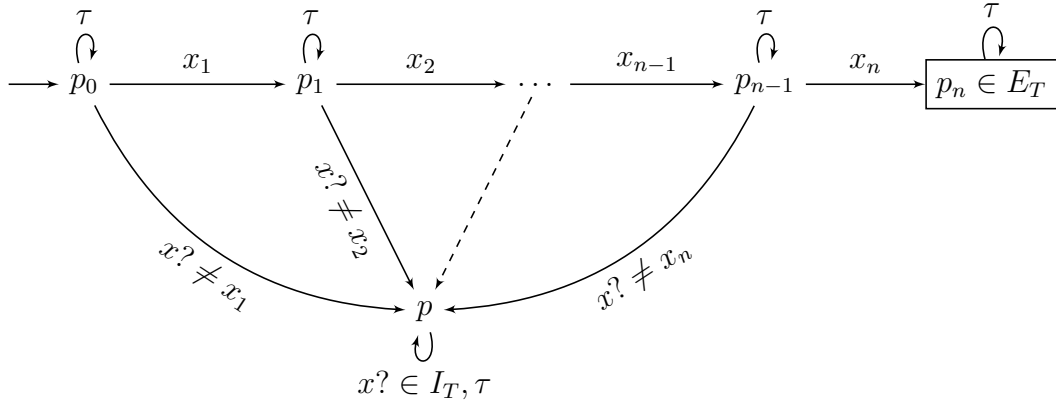
Fehler-Zustandes in  $P'_2 \parallel T$  für eine as-Implementierung  $P'_2$  von  $P_2$  geschlossen werden. Die weitere Argumentation verläuft dann analog zu Fall 2, derselben Inklusion im Beweis zu Lemma 3.13. Da  $\tau$ s nur interne Aktionen einer einzelnen Komponente sind, verändert sich auch nichts an den Traces über die argumentiert wird. Es können zwar möglicherweise  $\tau$ -Transitionen ausgeführt werden, diese können jedoch weder zu einem Fehler führen noch beeinflussen, dass ein anderer Trace nicht ausgeführt werden kann.

Nun wird mit dem zweiten Unterpunkt des ersten Beweispunktes begonnen. Genau wie im Beweis zu 3.13 ist hier jedoch aufgrund des bereits geführten Beweisteils nur noch  $L_1 \setminus ET_1 \subseteq EL_2$  zu zeigen. Es wird also für ein beliebig gewähltes  $w \in L_1 \setminus ET_1$  gezeigt, dass dieses auch in  $EL_2$  enthalten ist. Aufgrund der Propositionen 2.1 und 3.6 gibt es auch eine as-Implementierung  $P'_1$  von  $P_1$  für die  $w \in L_{P'_1} \setminus ET_{P'_1}$  gilt.

- Fall 1 ( $w = \varepsilon$ ): Ebenso wie in 3.13 gilt auch hier, dass  $\varepsilon$  immer in  $EL_2$  enthalten ist.
- Fall 2 ( $w = x_1 \dots x_n$  mit  $n \geq 1$ ): Die Konstruktion des Partners  $T$  weicht wie im letzten Beweisteil nur durch die  $\tau$ -must-Schleifen an den Zuständen des Transitionssystems vom Beweis des zweiten Punktes aus Lemma 3.13 ab. Somit ist der Partner  $T$  dann wie folgt definiert (siehe dazu auch Abbildung 4.2):

- $T = \{p_0, p_1, \dots, p_n, p\}$ ,
- $p_0 T = p_0$ ,
- $\rightarrow_T = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p) \mid x \in I_T \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, \tau, p_j) \mid 0 \leq j \leq n\}$   
 $\cup \{(p, \alpha, p) \mid \alpha \in I_T \cup \{\tau\}\},$
- $E_T = \{p_n\}$ .




 Abbildung 4.2:  $x? \neq x_j$  steht für alle  $x \in I_T \setminus \{x_j\}$ ,  $p_n$  ist der einzige Error-Zustand

Da durch die  $\tau$ -must-Schlingen an den Zuständen wie oben vermieden wird, dass es in einer Komposition mit  $T$  und auch in  $T$  selbst Ruhe-Zustände gibt, verläuft der Rest des Beweises dieses Punktes analog zum Beweis der selben Inklusionsrichtung von Lemma 3.13. Und somit gilt für alle Fälle (2a) bis 2d)), dass  $w$  in  $EL_2$  enthalten ist.

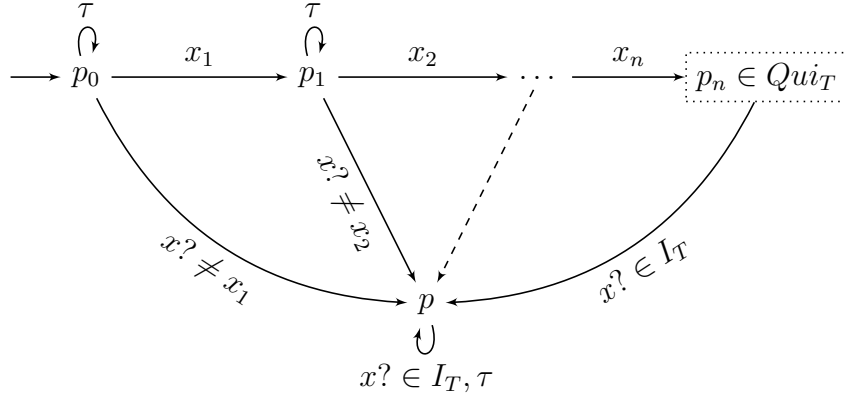
So bleibt nur noch der letzte Beweispunkt zu zeigen, d.h. die Inklusion  $QET_1 \subseteq QET_2$ . Die Inklusion kann jedoch, analog zum Beweis der Inklusion der Fehler-gefluteten Sprache, noch weiter eingeschränkt werden. Da bereits bekannt ist, dass  $ET_1 \subseteq ET_2$  gilt, muss nur noch  $StQT_1 \setminus ET_1 \subseteq QET_2$  gezeigt werden.

Es wird ein  $w \in StQT_1 \setminus ET_1$  gewählt und gezeigt, dass dieses auch in  $QET_2$  enthalten ist. Mit den Propositionen 3.6 und 4.4 kann gefolgert werden, dass es auch eine as-Implementierung  $P'_1$  von  $P_1$  gibt, für die  $w \in StQT_{P'_1} \setminus ET_{P'_1}$  gilt.

Durch die Wahl des  $w$ s wird vom Startzustand von  $P'_1$  durch das Wort  $w$  ein ruhiger Zustand erreichbar. Dies hat nur Auswirkungen auf die Parallelkomposition  $P'_1 \parallel T$ , wenn in  $T$  ebenfalls ein Ruhe-Zustand durch  $w$  erreichbar ist.

Das betrachtete  $w$  hat also die Form  $w = x_1 \dots x_n \in \Sigma^*$  mit  $n \geq 0$ . Es wird der folgende Partner  $T$  betrachtet (siehe auch Abbildung 4.3):

- $T = \{p_0, p_1, \dots, p_n, p\}$ ,
- $p_0 T = p_0$ ,
- $\longrightarrow_T = \{(p_j, x_{j+1}, p_{j+1}) \mid 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, x, p) \mid x \in I_T \setminus \{x_{j+1}\}, 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_j, \tau, p_j) \mid 0 \leq j < n\}$   
 $\cup \{(p_n, x, p) \mid x \in I_T\}$   
 $\cup \{(p, \alpha, p) \mid \alpha \in I_T \cup \{\tau\}\},$
- $E_T = \emptyset$ .


 Abbildung 4.3:  $x? \neq x_j$  steht für alle  $x \in I_T \setminus \{x_j\}$ ,  $p_n$  ist der einzige Ruhe-Zustand

Falls für das betrachtete  $w = \varepsilon$  gilt, reduziert sich der Partner  $T$  auf den Zustand  $p_n = p_0$  und den Zustand  $p$ . Es ist also in diesem Fall der Startzustand gleich dem ruhigen Zustand.

Allgemein ist der Zustand  $p_n$  aus  $T$  der einzig ruhige Zustand in  $T$ . Es gilt wegen des ersten Punktes von Lemma 4.7, dass auch in der Parallelkomposition  $P'_1 \parallel T$  ein Ruhe-Zustand mit  $w$  erreicht wird. Da es sich bei allen in  $w$  befindlichen Aktionen um synchronisierte Aktionen handelt und  $I_T \cap I = \emptyset$ , folgt  $w \in O_{P'_1 \parallel T}$  und  $w \in StQT(P'_1 \parallel T)$ . Es kann also in der Parallelkomposition durch  $w$  ein Ruhe-Zustand lokal erreicht werden. Da  $w \notin ET_{P'_1}$  gilt, kann auf dem Weg, der mit  $w$  im Transitionssystem  $P'_1$  zurückgelegt wird, kein Fehler lokal erreicht werden. Es kann also weder von  $P'_1$  noch von  $T$  ein Fehler auf diesem Weg geerbt werden und durch den Aufbau von  $T$  kann auch kein neuer Fehler in der Parallelkomposition der beiden Systeme entstehen. Da ein Ruhe-Zustand in  $P'_1 \parallel T$  lokal erreichbar ist, muss auch in  $P'_2 \parallel T$  für eine as-Implementierung  $P'_2$  von  $P_2$  ein „fehlerhafter Zustand“ lokal erreichbar sein. Es kann zunächst keine Aussage getroffen werden, ob das  $w$  in  $P'_2 \parallel T$  ausführbar ist und ob es sich bei dem „fehlerhaften Zustand“ um Ruhe oder einen Fehler handelt.

- Fall a) ( $\varepsilon \in ET(P'_2 \parallel T)$ ): Es handelt sich bei dem lokal erreichbaren „fehlerhaften Zustand“ um einen Fehler. Es ist somit nicht relevant, ob  $w$  ausführbar ist. Der Fehler-Zustand kann sowohl von  $P'_2$  geerbt sein, wie auch durch fehlende Input-must-Transitionen als neuer Fehler in der Parallelkomposition entstanden sein. Es gilt also, dass bereits in  $P'_2$  ein Präfix von  $w$  in  $ET_{P'_2}$  enthalten ist, wegen des Beweises des ersten Punktes aus Lemma 3.13 und das  $T$  nur neue Fehler auf dem Trace  $w$  zulässt. Da die Menge  $ET$  unter  $\text{cont}$  abgeschlossen ist, gilt also auch  $w \in ET_{P'_2} \subseteq QET_{P'_2}$ . Mit Proposition 4.6 folgt daraus  $w \in QET_2$ .
- Fall b) (Ruhe-Zustand lokal erreichbar in  $P'_2 \parallel T$  und  $\varepsilon \notin ET(P'_2 \parallel T)$ ): Da in  $T$  nur durch  $w$  ein ruhiger Zustand erreicht werden kann, muss es sich bei dem lokal erreichbaren Ruhe-Zustand in  $P'_2 \parallel T$  um einen handeln, der mit  $w$  erreicht werden kann. Mit Lemma 4.7 kann somit gefolgert werden, dass auch in  $P'_2$  ein Ruhe-

Zustand mit  $w$  erreichbar sein muss. Es gilt also  $w \in StQT_{P'_2} \subseteq QET_{P'_2} \subseteq QET_2$ , wegen Proposition 4.6.

□

**Satz 4.11.** *Fals  $P_1 \sqsubseteq_{Qui} P_2$  gilt folgt draus auch, dass  $P_1$   $P_2$  verfeinert.*

*Beweis.* TODO: zu beweisen

□

Es wurde somit, wie im letzten Kapitel, eine Kette an Folgerungen gezeigt, die sich zu einem Ring schließen. Dies ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

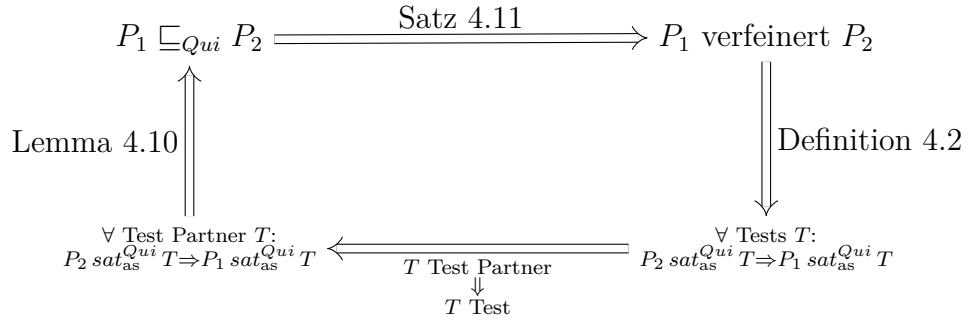


Abbildung 4.4: Folgerungskette der Testing-Verfeinerung und Fehler-Relation

TODO: Verfeinerung auf Basis des Testing-Ansatzes

# Literaturverzeichnis

- [BFLV16] Ferenc Bujtor, Sascha Fendrich, Gerald Lüttgen, und Walter Vogler, *Non-deterministic Modal Interfaces*, Theor. Comput. Sci. **642** (2016), 24–53.
- [BV15a] Ferenc Bujtor und Walter Vogler, *Error-pruning in interface automata*, Theor. Comput. Sci. **597** (2015), 18–39.
- [BV15b] ———, *Failure Semantics for Modal Transition Systems*, ACM Trans. Embedded Comput. Syst. **14** (2015), no. 4, 67:1–67:30.
- [Sch16] Ayleen Schinko, *Kommunikationsfehler, Verklemmung und Divergenz bei Interface-Automaten*, Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2016.