Web-basierte Systeme

08: Architektur moderner Browser

Wintersemester 2025

Rüdiger Kapitza

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Architektur moderner Browser

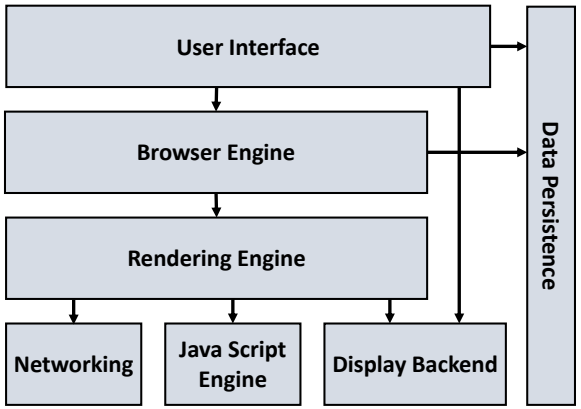
Vorläufiger Vorlesungsplan

16. Oktober	Einführung und Darstellung von Webseiten
22. Oktober	HTML und CSS
29. Oktober	Hypertext Transfer Protocol
5. November	
12. November	Browser Schnittstellen
19. November	Kommunikationsschnittstellen im Browser
26. November	WebAssembly
3. Dezember	Architektur moderner Browser
10. Dezember	Clientseitige Architekturmuster
17. Dezember	**Serverseitige Implementierung von Web-basierten Syste**
	Vorbereitung Papieranalyse
7. Januar	Lastverteilung durch Zwischenspeicher
14. Januar	Papieranalyse
21. Januar	Aspekte von Web Sicherheit
28. Januar	Web3
5. Februar	Zusammenfassung und Ausblick

Architektur moderner Browser

Zielsetzung der Lerneinheit

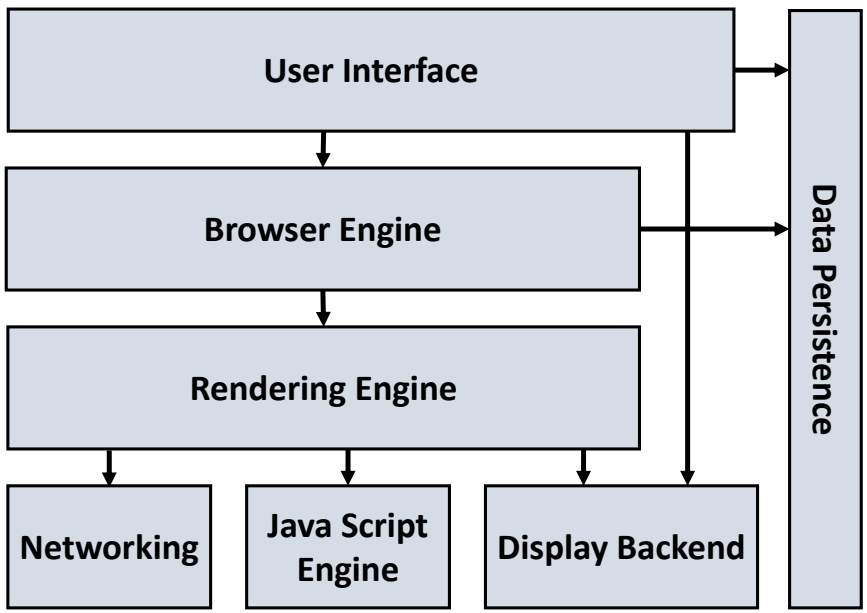
- Allgemeines Verständnis für die Architektur eines Browsers
- Verständnis für Fusion die von HTML, CSS & JS zu einem Layout
- Kennenlernen von Systemansätzen zur Verbesserung der Leistung und Sicherheit von Browsern
  - Beispiel: Chromium



Architekturüberblick

Generische Softwarearchitektur eines Browsers

- Vgl. *„A Reference Architecture for Web Browsers“ (von 2005!)* [2]
- Die Arbeit stellt eine generische Softwarearchitektur vor, die durch die Analyse verschiedener Browser entwickelt wurde.



Architekturüberblick

User Interface

- Schicht zwischen Nutzer und der Engine des Browsers
- Stellt die Oberfläche bereit: Werkzeugleiste, Rahmen mit Fortschrittsanzeige, Masken für Einstellungen, usw.
- Nicht selten Einbettung in den Desktopmanager des Systems

Architekturüberblick

Browser Engine

- Implementiert die Grundfunktionen des Browsers und bietet eine Schnittstelle zur Rendering-Engine
- Funktionen sind z.B: Laden einer URI, Navigieren im Verlauf der bisher aufgesuchten Seiten oder erneutes Landen einer Seite
- Schnittstelle zur Abfrage von Sitzungsinformationen
  - Z.B.: Fortschrittsanzeige oder Warnungen der JavaScript-Engine
- Schnittstelle zur Statusabfrage der Rendering-Engine und zu deren Parametrierung

Architekturüberblick

Rendering Engine

- Zuständig für die Darstellung einer HTML-Seite unter Verwendung von CSS und der Integration von Grafiken
- Es wird das genaue Layout festgelegt (Positionierung aller Elemente) und aktualisiert, sobald weitere Informationen verfügbar sind
- Zentraler Bestandteil des Rendering Engine sind HTML- & CSS-Parser

Architekturüberblick

Networking

- Unterstützung für den Transfer von Daten via HTTP(S) (TCP/QUIC)
- Konvertierung zwischen Zeichensätzen, sowie Unterstützung für MIME media Typen
- Unterstützung für die Zwischenlagerung aktueller Daten

Architekturüberblick

JavaScript Interpreter

- Unterstützung für JavaScript (ECMAScript)
- Interaktion mit der Rendering Engine

XML Parser

- Ursprünglich separates Architekturelement, heute wahrscheinlich in andere Komponenten integriert

WebAssembly

- Mittlerweile neu hinzugekommen

Architekturüberblick

Display Backend

- Stellt Grafikprimitive bereit
- Schnittstellen zum Desktopmanager und dem Betriebssystem
  - Bspw.: Look & Feel unter Linux vs. Windows und Schrifttypen

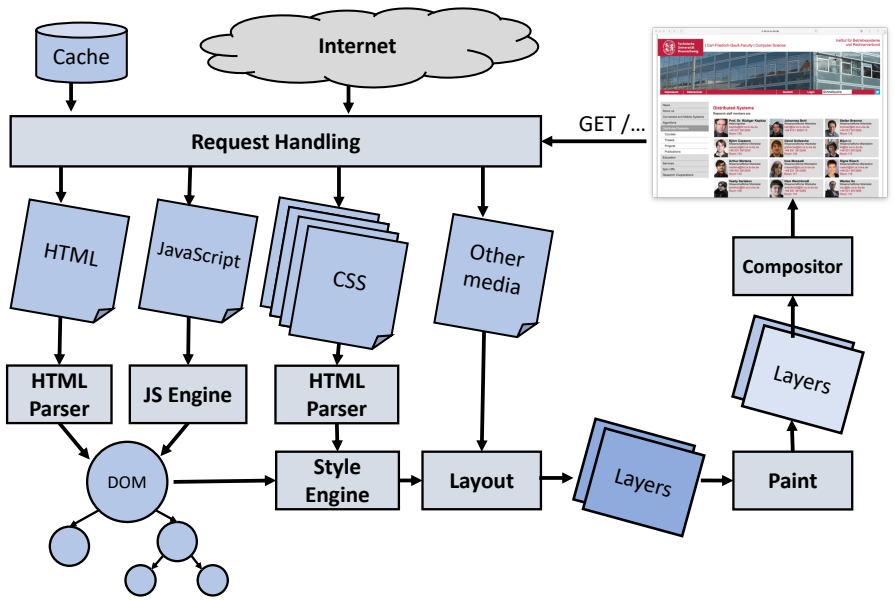
Data Persistence

- Verwaltung von Sitzungsdaten
- Verwaltungsdaten: Lesezeichen und Einstellung der Oberfläche
- Zwischenspeicher (Cache)
- Sicherheitsinformationen: Zertifikate etc.

Architekturüberblick (Firefox Quantum)

Architekturüberblick mit Fokus auf Firefox Quantum

- Quelle: Blog-Artikel zur Funktionsweise von Quantum[1]
- *Achtung:* Artikel behandelt die *Browser Engine* – im Sinne von [2] entspricht dies aber *eher* der Rendering Engine



[1] https://hacks.mozilla.org/2017/05/quantum-up-close-what-is-a-browser-engine

Architekturüberblick (Firefox Quantum)

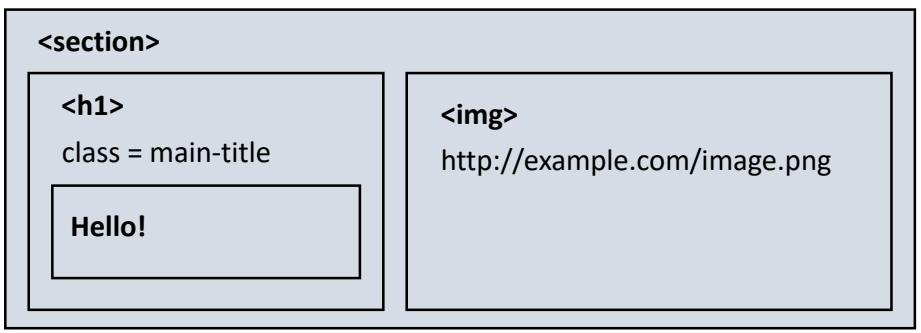
Vereinfachter Ablauf: Laden und Parsen

- Daten werden vom Modul Request Handling geladen
  - HTML, Grafiken, CSS und JavaScript
- Der HTML-Parser wandelt HTML-Dokumente in ein Document Object Model (DOM) um - einen so genannten Inhaltsbaum
- Andere Styledaten und Skripte, die im HTML enthalten oder referenziert sind, werden ebenfalls geladen und verarbeitet.
- Skripte können die Seitenstruktur und Styledaten verändern, bevor ein HTML-Dokument vollständig geparst wurde

Architekturüberblick (Firefox Quantum)

Vereinfachter Ablauf: Laden und Parsen

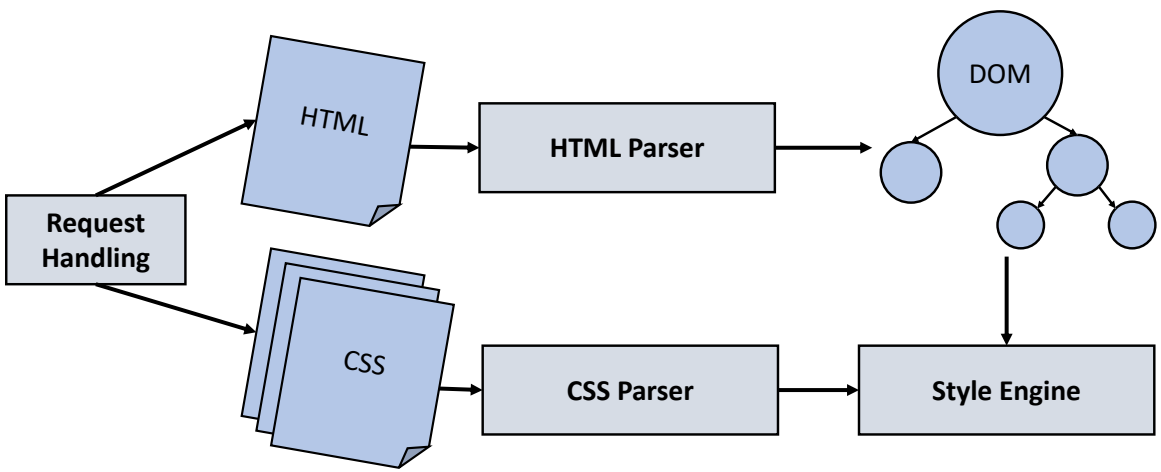
```
1  <section>
2   <h1 class="main-title">Hello!</h1>
3   <img src="http://example.com/image.png">
4  </section>
```



Architekturüberblick (Firefox Quantum)

Vereinfachter Ablauf: Verarbeitung von CSS

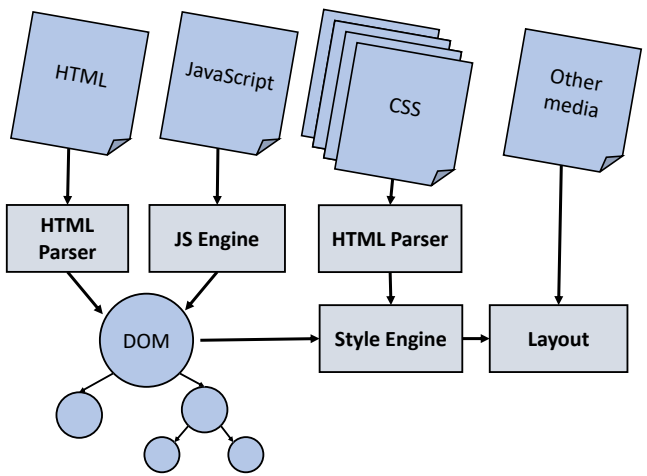
- Style-Anweisungen werden ebenfalls geparst und auf das DOM angewendet, dies übernimmt die *Style Engine*
- Sind alle Style-Anweisungen ausgeführt worden, spricht man von einem *computed style*
  - Wirken mehrere Anweisungen auf ein Element, überschreibt die zuletzt angewandte Anweisung die vorhergehenden.



Architekturüberblick (Firefox Quantum)

Vereinfachter Ablauf: Erzeugen des Layouts

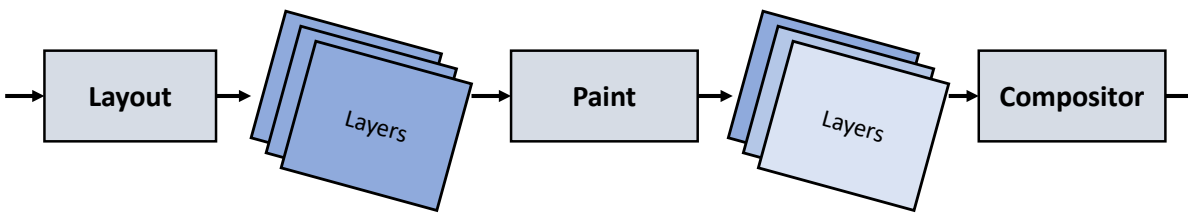
- DOM und die ermittelten Style-Anweisungen werden an die Layout Engine übergeben
- Die Layout Engine berechnet das Layout basierend auf der gegebenen Fenstergröße
- Dabei wird jedes Element einzeln betrachtet, entsprechend dimensioniert und alle Style-Anweisungen werden angewendet



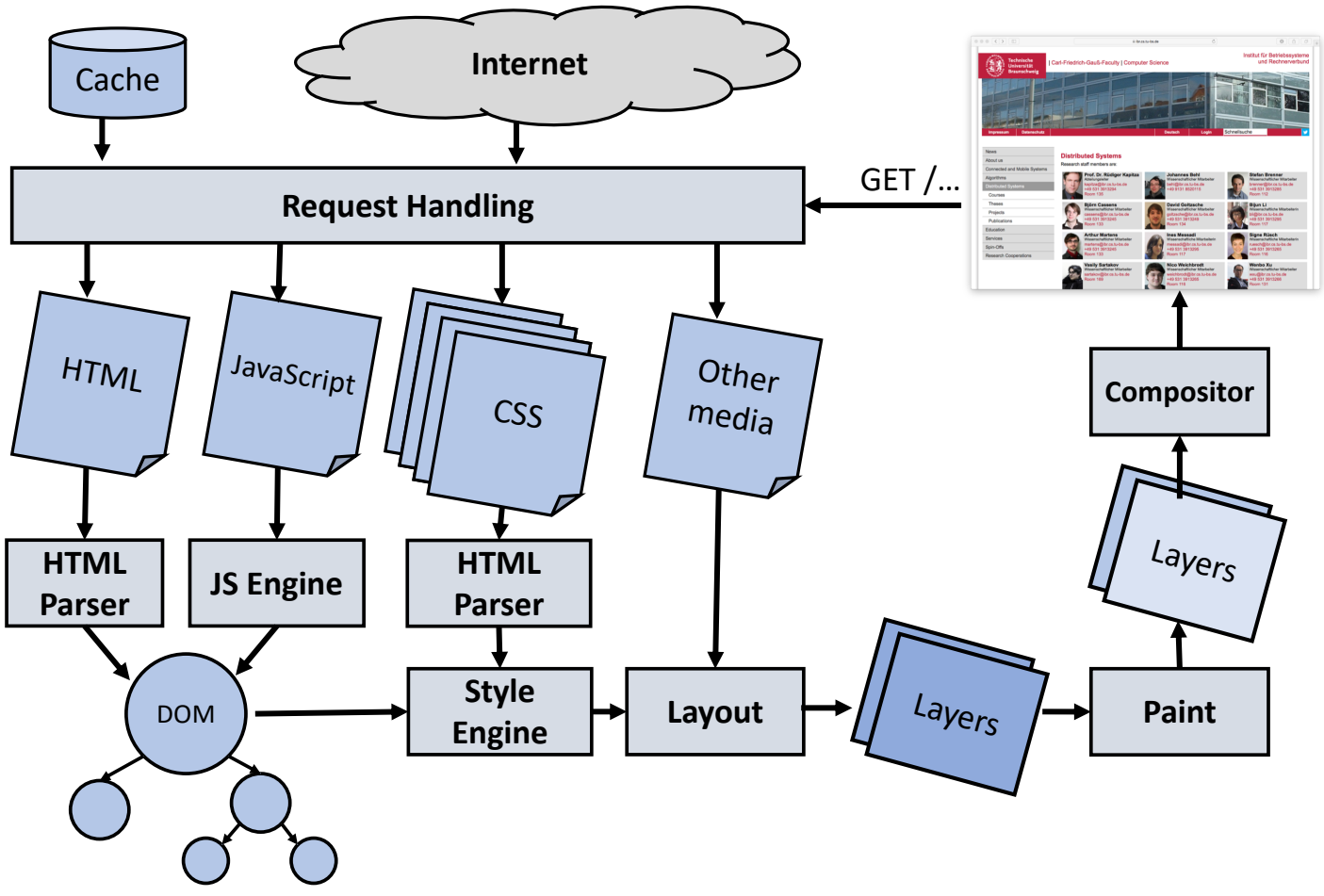
Architekturüberblick (Firefox Quantum)

Vereinfachter Ablauf: Darstellung im Browser

- Im letzten Schritt werden die berechneten Elemente mit allen Informationen dargestellt und die Seite für den Benutzer sichtbar gemacht
- Wenn der Benutzer den sichtbaren Bereich der Seite ändert, muss die Seite neu gezeichnet werden
  - Dies kommt häufig vor, und Browser berechnen entsprechend mehr als den Viewport, um schnell reagieren zu können



Architekturüberblick (Firefox Quantum)



Mehrprozessbrowserarchitektur & Isolation von Webanwendungen

Motivation

- Browser werden immer komplexer
- Webanwendungen nehmen ebenfalls in der Komplexität zu!
  - Beispiel: Single Page Apps (SPAs) & Progressive Web Apps (PWAs)
- Fehler in Browsern und Angriffe sind an der Tagesordnung
- Bedarf nach einer widerstandsfähigen Browser-Architektur

Ausgangspunkt

- Frühere Browser wurden als *Monolithen* konzipiert!
- Alle Architekturkomponenten haben vollen Zugriff
  - Zum Beispiel auf das Dateisystem
- Fehler können zum Absturz des gesamten Browsers führen
- Schlecht Isolation auch bezgl. Performance

Mehrprozessbrowserarchitektur & Isolation von Webanwendungen

Zielsetzung für die Mehrprozessarchitektur von Chromium

- Etablierung von Abstraktionen zur besseren Isolierung der einzelnen Komponenten eines Browsers
- Isolationskonzepte müssen so weit wie möglich mit den bestehenden Systemannahmen kompatibel sein
- Eine Mehrprozessarchitektur bietet bessere Sicherheit, Fehlertoleranz, Ressourcenverwaltung und Ausführungsgeschwindigkeit

Literatur

- *The Security Architecture of the Chromium Browser* [1]
- `https://www.chromium.org/developers/design-documents/multi-process-architecture`
- *Isolating Web Programs in Modern Browser Architectures* [3]
- `https://www.chromium.org/developers/design-documents/site-isolation`

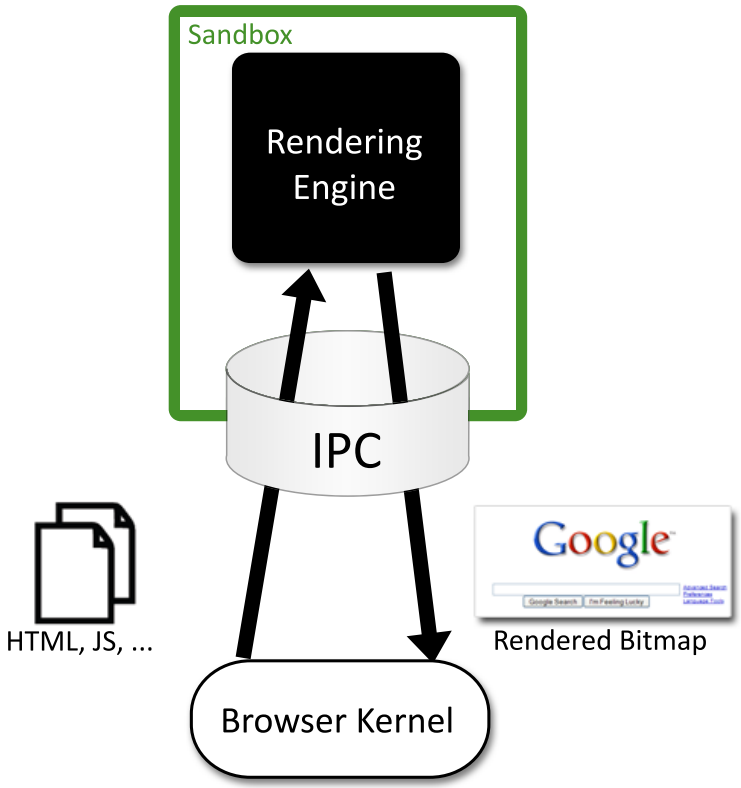
Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Angreifermodel

- Entfernter Angreifer, der eine Lücke im Code des Browsers kennt
- Um die Schwachstelle auszunutzen, muss der Angreifer den Benutzer dazu bringen, Schadcode zu laden
- Ziele des Angreifers
  - Installation von Schadsoftware wie z.B. Keylogger
  - Entwenden von wichtigen Daten/Dateien
- Angriffe, die nicht berücksichtigt werden, weil sie nicht durch die Multiprozessarchitektur adressiert werden:
  - Phishing und Schwachstellen in Webanwendungen (z.B. für cross-site scripting (XSS))

Architekturüberblick

- Architektur wie 2008 etabliert ([1])



Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Funktionsaufteilung

- Rendering Engine
  - HTML/XML/XSLT/CSS parsing, Bilder dekodieren, SVG, Document Object Model (DOM), JavaScript Interpreter
  - Sonstiges: regulärer Ausdrücke
- Browser Engine
  - Verwaltung von persistenten Information
  - Zugriff auf native Grafikelemente bzw. den Fenstermanager
  - Oberfläche des Browsers (z.B. Location Bar)
  - Netzwerkfunktionen
  - *Achtung:* Die Browser Engine ist wesentlich weiter gefasst als in [2]
- Gemeinsame Funktionen
  - URL und Unicode parsing

Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Ziel der Aufteilung

- Rendering Engine enthält komplexen Code, der Webanwendungen ausführt und eher fehleranfällig ist
- Browser Engine enthält hauptsächlich Code, der direkt auf das System zugreifen kann

Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Sandbox

- Entzieht der Rendering Engine alle Rechte und verhindert den direkten Zugriff auf das System.
- Stattdessen wird die Schnittstelle der Browser Engine für alle wichtigen externen Aufrufe genutzt

IPC (Inter-Process Communication)

- Schneller und effizienter Austausch zwischen Browser Engine und Rendering Engine
- Low-level IPC – ursprünglich über async. *named pipes* realisiert
- Inzwischen eigenes System (Mojo[2]), das auf verschiedene Subsysteme (z.B. Unix Domain Sockets) abgebildet werden kann

[2] `https://chromium.googlesource.com/chromium/src/+/master/mojo/README.md`

Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Granularität der Aufteilung

- Vereinfacht kann (vorerst) angenommen werden, dass jedes *Fenster/Tab* einer eigenen Rendering-Engine-Instanz entspricht.
- Wichtige Informationen, wie z.B. Fehlermeldungen zu HTTPS-Zertifikaten oder Warnungen vor Phishing-Versuchen, werden über eine separate Instanz kommuniziert
- Ausnahmen gibt es bei Warnungen zu dedizierten Seiteninhalten, diese werden in der verarbeitenden Rendering Engine erzeugt

Externe Hilfsprogramme (Plug-ins)

- Hilfsprogramme werden als eigene Prozesse betrieben (evtl. auch in einer Sandbox)
- Es gibt in der Regel nur eine Instanz pro Plug-in

Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Schnittstelle der Browser Engine

- Rendering
  - Alles wird gezeichnet und an die Browser Engine übergeben
  - Browser Engine übergibt die Bilddaten an die entsprechenden Grafikschnittstellen zur Darstellung
  - Im Rahmen der IPC bedeutet dies einen zusätzlichen Kopiervorgang (!)
- Benutzereingaben
  - Alle Benutzereingaben werden vom Betriebssystem an die Browser Engine übergeben
  - Browser Engine wertet Eingaben entweder direkt aus oder gibt sie je nach Fokus an die Rendering Engine
  - Rendering Engine erhält nur Ereignisse, die sich direkt an die ausgeführte Webanwendung gerichtet sind

Sicherheitsarchitektur des Chromium Browsers

Schnittstelle des Browser Engine (Fortsetzung)

- Persistenter Speicher
  - Aufgabe der Sandbox ist es, zu erzwingen, dass die Rendering Engine (bspw. bei Übernahme) nicht auf Dateien zugreifen kann
  - Vom Browser initiierte Dialogfenster informieren den Benutzer über Up- und Downloads.
  - Bei Downloads ist der Speicherort der Dateien voreingestellt, z.B. ein Standardverzeichnis
  - Ziel ist es, das Überschreiben von Dateien oder das Ablegen an kritischen Stellen zu verhindern

Schnittstelle des Browser Engine (Fortsetzung)

- Netzwerk
  - Netzwerkverkehr wird durch die Browser Engine abgewickelt
  - Rendering Engine stellt Anfragen an den Browser Engine
    - Bei Protokollen wie `http(s)` (und `ftp`) lädt die Browser Engine die Daten und übergibt sie an die Rendering Engine
    - Typischerweise wird `file`-URIs blockiert, da die Rendering-Engine sonst Zugriff auf das Dateisystem hätte
    - Ausnahme, wenn der Benutzer z.B. über die Location Bar explizit eine solche URL eingibt. In diesem Fall wird die URL über eine separate Rendering Engine Instanz verarbeitet

Evaluation

- Wirksamkeit wird überprüft mit Hilfe der Betrachtung von *Common Vulnerabilities and Exposures (CVEs)*[3]
- Betrachtung der CVEs zwischen Juli 2007 und Juli 2008 für Internet Explorer, Firefox und Safari
- Frage: Welche der veröffentlichten Schwachstellen können durch die vorgeschlagene Architektur vermieden werden?
  - Antwort: 38 von 87 der Rendering Engine zugeordneten Schwachstellen können verhindert werden
  - Dies entspricht 70,4% (38 von 54) aller Schwachstellen, die die Ausführung von beliebigem Code erlauben
- Mehr Details im technischen Bericht [1]

[3] https://cve.mitre.org

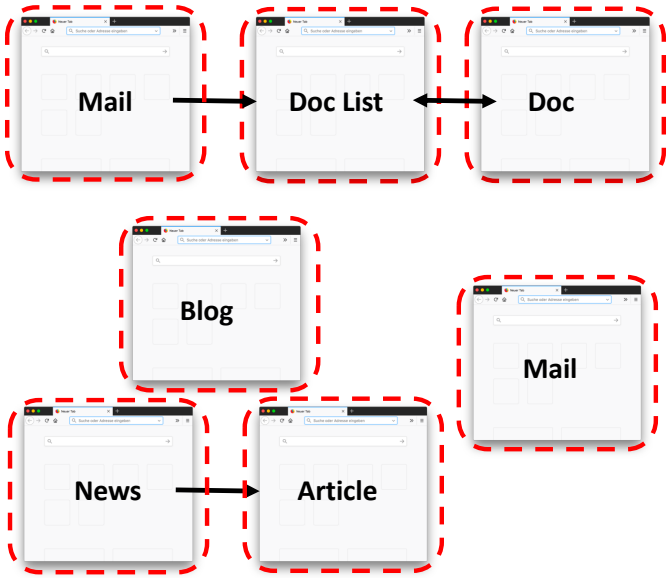
Isolation von Webanwendungen

- Verschiedene unabhängige Web-Anwendungen werden im Kontext eines Browsers ausgeführt
- Vergangenheit: **Alle** Anwendungen einem Prozess zugeordnet!
- Wie kann man komplexe Webanwendungen auf eine Mehrprozessbrowserarchitektur abbilden?

Isolation von Webanwendungen

Naiver Vorschlag

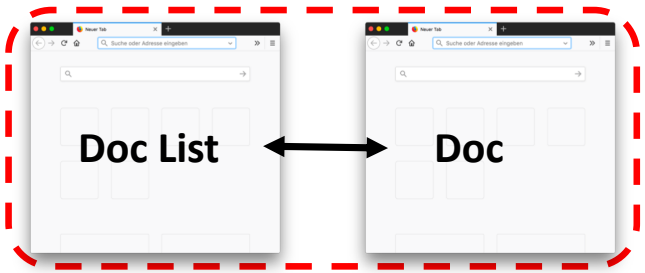
- Jedes Fenster/Tab erhält seinen eigenen Prozess
- Bricht mit den Annahmen typischer Webanwendungen, die Daten *miteinander* austauschen!
  - Gegenseitiger Zugriff auf den DOM nicht mehr möglich



Isolation von Webanwendungen

Zielsetzung

- Entwicklung einer Abstraktion, die Webanwendungen identifizierbar macht und ihre Isolation ermöglicht
- Gruppierung von zusammengehörigen Fenstern
  - Sollte den intuitiven Annahmen entsprechen und kompatible zu existierenden Webanwendungen sein
- Idee: Ausnützen von existierenden Informationen
- Zusammengehörige Fenster sollen durch einen Prozess ausgeführt werden



Isolation von Webanwendungen

Annäherung durch eine *ideale* Abstraktion

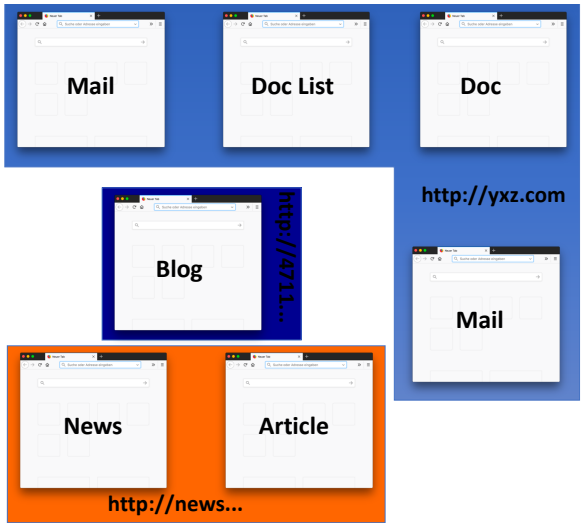
- **Webanwendung** (Web Program)
  - Menge von verknüpften Seiten und zugeordneten Ressourcen, die einen Dienst implementieren
- **Instanz einer Webanwendung** (Web Program Instance)
  - Eine laufende Instanz einer Webanwendung in einem Browser
  - Isolation erfolgt mit Unterstützung der Browserarchitektur

- Wie kann das konkret umgesetzt werden?

Isolation von Webanwendungen

Isolation auf Grund des Website

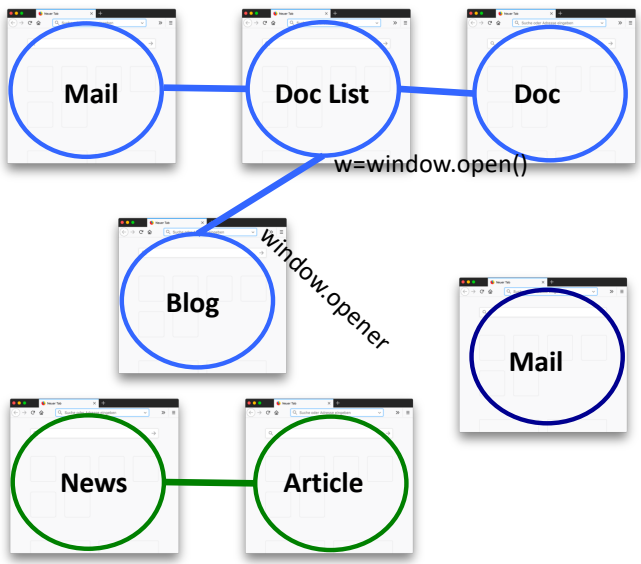
- *Same Origin Policy* erzwingt bereits eine gewisse Isolation auf der Basis von Host, Protokoll und Portnummer
- Beschränkung nur im Rahmen des Domänennamen
- Website ist durch den Domänennamen, Protokoll und Port definiert



Isolation von Webanwendungen

Browsing Instanzen

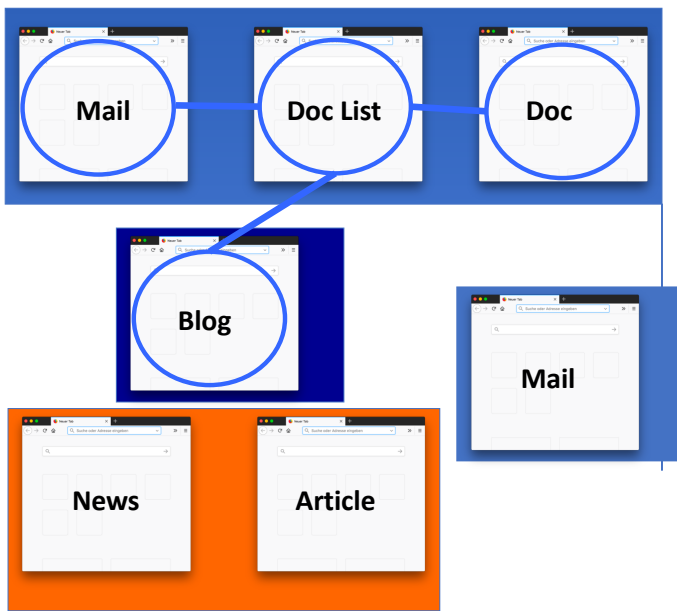
- Referenzen zwischen *verwandten* Fenstern
  - Eltern/Kind Relation durch `window.open()`
    - Zugriff auf den DOM der geöffneten Seite
  - Lebenszyklus eines Fensters
- Verbindung von Fenstern unabhängig vom Website



Isolation von Webanwendungen

Website Instanzen

- Vereingiungsmenge von Website und Browsing Instanz
- Ermöglicht sichere Isolation von anderen Seiten
- Bildet eine kompatible Variante einer Webanwendung



Evaluierung

- Performance Isolation
  - Im Vergleich zu einer monolithischen Konfiguration reagiert der Browser unter Last wesentlich schneller auf externe Ereignisse
  - Verbesserte Geschwindigkeit durch Ausnutzung von Mehrkernsystemen
- Verzögerung durch die Erzeugung eines Prozesses ist bzgl. der Laufzeit nicht relevant
- Speicherbedarf nimmt spürbar zu, ist aber zu erwarten und ein akzeptabler Kompromiss

Zusammenfassung

- Browser bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten
  - Speziell die Rendering Engine ist kritisch, da sie entscheidet ob Webseiten einheitlich dargestellt werden
  - Aktuell gibt es wenige Kernsysteme die von verschiedenen Browsern genutzt werden (z.B. Webkit, Blink und Gecko)
- Ähnlich zu Betriebssystemen haben sich Mehrprozessarchitekturen auch bei Browsern durchgesetzt
  - Gründe sind Sicherheit, Fehlertoleranz aber auch Leistung
  - Weitere Informationen: *Site Isolation: Process Separation for Web Sites within the Browser*

    `https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity19/presentation/reis`
- Betrachtete Architekturaspekte kratzen nur an der Oberfläche
  - Bspw. sind die internen Abläufe komplexer als dargestellt

Literatur

[1] Adam Barth et al. *The Security Architecture of the Chromium Browser*. Jan. 2008.

[2] Alan Grosskurth und Michael W. Godfrey. “A Reference Architecture for Web Browsers”. In: *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Software Maintenance*. ICSM ’05. IEEE Computer Society, 2005, S. 661–664.

[3] Charles Reis und Steven D. Gribble. “Isolating Web Programs in Modern Browser Architectures”. In: *Proceedings of the 4th ACM European Conference on Computer Systems*. EuroSys ’09. Nuremberg, Germany: ACM, 2009, S. 219–232.