

Ressource Holz nachhaltig nutzen

Simulationsmodell zur Untersuchung verschiedener Handlungsoptionen bei der Holznutzung in der Schweiz – Eine Analyse im Auftrag des Kantons Luzern

Schlussbericht

Justus Gallati

Alexander Scheidegger

FHS St. Gallen, Institut für Modellbildung und Simulation

14. Februar 2014

Impressum

Auftraggeber:

Dienststelle Landwirtschaft und Wald (lawa), Kanton Luzern

Dienststelle Umwelt und Energie (uwe), Kanton Luzern

Auftragnehmer: Institut für Modellbildung und Simulation, Fachhochschule St.Gallen

Autoren: Justus Gallati, Alexander Scheidegger

Begleitung: Thomas Abt, Alex Arnet, (lawa), Thomas Joller, Beat Marty (uwe)

Hinweis: Diese Studie wurde mitfinanziert durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung.

Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

Zusammenfassung.....	7
1. Einleitung.....	10
2. Methodisches Vorgehen.....	12
3. Holzflussmodell im Kontext.....	14
4. Datengrundlage.....	16
5. Modellstruktur.....	20
6. Basis-Szenario (Referenz-Szenario).....	24
7. Validierung.....	27
7.1. Vorgehen	27
7.2. Extremszenarien	27
7.3. Ergebnisse der Validierung anhand der Extremszenarien	33
7.4. Sensitivitätsanalyse	35
7.5. Schlussfolgerungen zur Validierung.....	40
8. Resultate.....	41
8.1. Einleitung: Handlungsoptionen und Umfeld	41
8.2. Handlungsoption H1 (Förderung Holzernte)	43
8.3. Handlungsoption H2 (Verschiebung Nadel- zu Laubwald).....	44
8.4. Die Handlungsoptionen in einem veränderten Umfeld.....	46
8.5. Anteil stoffliche Nutzung	53
9. Kausalzusammenhänge und qualitatives Kausalmodell.....	54
10. Schlussfolgerungen.....	61
11. Diskussion	64
12. Weiterentwicklung	66
13. Literatur	69
14. Anhang.....	70
14.1. Modelldokumentation.....	70
14.2. Grafiken zu Abschnitt 7.4 (Sensitivitätsanalyse).....	74

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Überblick Stoffstrommodell mit Systemgrenze (graue Fläche bezeichnet die im Modell abgebildeten Prozesse).....	13
Abbildung 2: Forststatistik, LFI und "wahrer Wert" der Holznutzung.....	17
Abbildung 3: Aufbau des Modells im Überblick.....	21
Abbildung 4: Basis-Szenario: Zuwachs, Nutzung total, Ernte Stammholz (inkl. Ernteverluste) ...	24
Abbildung 5: Basis-Szenario: Vorratsentwicklung (mit Vergleich zu LFI2, LFI3)	25
Abbildung 6: Basis-Szenario: Verbrauch Energieholz total (inkl. Altholz, ohne KVA), Verbrauch Schnitzelfeuerungen (Waldenergieholz, Restholz), im Vergleich zum Verbrauch Energieholz gemäss Holzenergiestatistik 2011.....	26
Abbildung 7: Extremszenarien - Entwicklung beim Stammholz (Säge-Rohholz).....	28
Abbildung 8: Extremszenarien - Potenzial Energie- und Industrieholz ("Schwachholz")	29
Abbildung 9: Extremszenarien - Vorrat total (pro ha).....	30
Abbildung 10: Extremszenarien - Automatische Feuerungsanlagen	31
Abbildung 11: Extremszenarien - Preis Energieholz (Waldhackschnitzel).....	32
Abbildung 12: Extremszenarien – Industrieholz.....	33
Abbildung 13: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf die Ernte von Stammholz	43
Abbildung 14: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf den Preis von Stammholz	44
Abbildung 15: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Ernte von Stammholz	45
Abbildung 16: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf den Preis von Stammholz.....	45
Abbildung 17: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Verfügbarkeit von Industrieholz.....	46
Abbildung 18: Einschnitt Rohholz Schweiz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008).....	47
Abbildung 19: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf die Nutzung von Stammholz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008).....	48
Abbildung 20: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Nutzung von Stammholz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008).....	48
Abbildung 21: Gesamte Holznutzung (inkl. Ernteverluste) im Vergleich von Extremszenario E2 (starker Preisanstieg fossile Energie) und U2 (moderater Preisanstieg fossile Energie).....	49
Abbildung 22: Holznutzung total im Vergleich von Basis-Szenario, Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien 2008) und Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie).....	50
Abbildung 23: Gesamte Holznutzung (inkl. Ernteverluste) unter Berücksichtigung der Förderung der Holzernte (H1) im Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie)	50
Abbildung 24: Summe Stammholz bei einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald H1 im Umfeld U2 (Preisanstieg fossile Energie).	51
Abbildung 25: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (H2) auf die Verfügbarkeit von Industrieholz im Umfeld U2 (Preisanstieg fossile Energie).....	52
Abbildung 26: Anteil stoffliche Nutzung.	53
Abbildung 27: Kausalmodell Holznutzung mit den „balancing“ Loops B1 – B6.	57
Abbildung 28: Kausalmodell Holznutzung mit den „reinforcing“ Loops R1, R2.....	58
Abbildung 29: Kausalmodell Holznutzung mit einem weiterreichenden „reinforcing“ Loop R3..	59
Abbildung 30: Weiterentwicklung des Modells. Die gestrichelten Pfeile geben an welche Wirkungszusammenhänge zusätzlich berücksichtigt werden könnten.	67

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Holznutzung Schweiz, Vergleich LFI, Holzflussbilanz, Forststatistik.....	16
Tabelle 2: Energieholzpotenzial	17
Tabelle 3: Potenziale Energieholz Kanton Luzern	19
Tabelle 4: Annahmen.....	23
Tabelle 5: Extremszenarien.....	27
Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse Nutzungsrate Durchforstung	36
Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse Diffusionskonstante Zubau automatische Feuerungsanlagen	37
Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse funktionaler Zusammenhänge	39
Tabelle 9: Handlungsoptionen und ihre Umsetzung im Modell	41
Tabelle 10: Umfeld und ihre Umsetzung im Modell	42

Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Projekts bestand darin, Entscheidungsgrundlagen für die Beurteilung verschiedener Handlungsoptionen bei der Holznutzung im Kanton Luzern zu erarbeiten. Diese Grundlagen sollten durch ein dynamisches Simulationsmodell geliefert werden, welches in Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteuren erstellt werden sollte.

Die zu untersuchenden Strategien und Handlungsoptionen beziehen sich einerseits auf die Forstwirtschaft und andererseits auf die Holznutzung. Bei der Forstwirtschaft sind es im Wesentlichen zwei Handlungsoptionen, die hier berücksichtigt werden, Fördermassnahmen bei der Holzernte sowie Veränderungen bei der Zusammensetzung der Hauptbaumarten. In Bezug auf die Holznutzung wird die Auswirkung einer verstärkten energetischen Nutzung untersucht. Dabei handelt es sich nicht um eine direkte Förderung, sondern um die Untersuchung der Auswirkung einer verstärkten energetischen Nutzung aufgrund der Entwicklung bei den Wärmegestehungskosten bzw. eines starken Zubaus von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen).

Die Handlungsoptionen werden in verschiedenen Umfeldern untersucht, welche verschiedenen externen Rahmenbedingungen entsprechen. Diese betreffen einerseits die Wirtschaftlichkeit der Sägereien im internationalen Wettbewerb („Euro-Krise“) und andererseits die Entwicklung bei den Preisen für fossile Energie.

Für die Untersuchung der verschiedenen Holznutzungsszenarien wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches auf der Grundlage der als wesentlich erachteten Wirkungsmechanismen die zeitliche Entwicklung bei der Nutzung der verschiedenen Holzsortimente berechnet. Neben dem Simulationsmodell wurde für die übersichtliche Darstellung und die Diskussion der verschiedenen Wirkungsmechanismen ein qualitatives Kausalmodell erstellt. Das Modell nimmt Bezug auf die verschiedenen massgeblichen Statistiken (Jahrbuch Holz, Forststatistik, LFI, Holzenergiestatistik) und kann in diesem Sinn als eine konsistente Darstellung der vorhandenen Daten betrachtet werden. Aufgrund der stark kantonsübergreifenden Stoffflüsse und der verfügbaren Daten wurde das Simulationsmodell für die Schweiz erstellt.

Unter Annahme der heutigen Rationalität in der Holznutzung, wonach das Stammholz (Säge-Rohholz) das Leitsortiment für die Holznutzung darstellt, ergeben sich aus der Modellierung folgende Schlussfolgerungen:

Förderung auf der Angebots- oder auf der Nachfrageseite?

Eine Förderung auf der Angebotsseite sollte mit Massnahmen auf der Nachfrageseite verbunden werden. Die Förderung der Holzernte alleine auf der Angebotsseite (Förderbeiträge auf Flächen mit hohen Erntekosten) würde zwar die Holzernte insgesamt erhöhen, aufgrund des höheren Angebots aber auch zu einem tieferen Preis führen. Eine Förderung auf der Nachfrageseite (Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten) dagegen kann zu einer grösseren Holzernte führen, bei der im Grundsatz auch höhere Preise für Stammholz möglich sind. Dies gilt jedoch explizit nur unter der Voraussetzung dass durch diese Massnahme die Wirtschaftlichkeit der Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten erhalten bleibt oder im Idealfall sogar verbessert werden kann.

Verschiebung Nadel- zu Laubwald

Die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald lässt bis 2050 unter den hier getroffenen Annahmen keine fundamentalen Veränderungen erwarten, weder beim Stammholz, noch beim Schwachholz. Unter diesen Annahmen nimmt der Anteil Nadelwald von 65% in 2000 auf rund 52% in 2050 ab. Einer leichten Abnahme beim Stammholz im Vergleich zum Basis-Szenario steht eine entsprechende Zunahme beim Schwachholz (Energie- und Industrieholz) gegenüber, ohne dass dadurch der Anteil der stofflichen Nutzung markant abnehmen würde. Ein Grund dafür besteht darin, dass aufgrund eines steigenden Preises beim Stammholz die Ernte von Stammholz verstärkt wird. Es ist daher zu erwarten, dass sich durch eine Verschiebung von Nadel- zu Laubwald die Holznutzung insgesamt verstärken wird. Diese Entwicklung ist wie bereits erwähnt nur dann zu erwarten, wenn der Preisanstieg beim Stammholz die Wirtschaftlichkeit bzw. internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Sägereien nicht gefährdet. In Bezug auf das Industrieholz ist die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald positiv zu bewerten, weil mehr Holz zur Verfügung steht und der Preis für Energieholz tendenziell langsamer ansteigt.

Veränderungen im Umfeld haben grösseren Einfluss als die untersuchten Massnahmen

Die Analyse der beiden Handlungsoptionen in verschiedenen Umfeldern hat gezeigt, dass von der Veränderung der Umfeldern der grössere Einfluss ausgeht, als von den Massnahmen bzw. Handlungsoptionen selber. Die angestrebte Wirkung der Massnahmen ist zwar zu beobachten, aber es ist das Umfeld, welches massgeblich bestimmt, auf welchem absoluten Niveau diese Veränderung vor sich geht. Der Einfluss eines Umfelds ist daher bei der Beurteilung der zu erwartenden Wirkung einer Massnahme auf jeden Fall zu berücksichtigen.

Verstärkte energetische Nutzung

Eine verstärkte energetische Nutzung hat drei verschiedene Auswirkungen, die zu unterscheiden sind: eine Verschiebung innerhalb des Schwachholz-Sortiments, eine Vergrösserung des Anteils Schwachholz zu Lasten des Stammholzes, und eine Ausweitung der gesamten genutzten Holzmenge. Bei gleichbleibender Gesamtmenge ist ein Zielkonflikt zwischen Energie- und Industrieholz zu erwarten, mit einem abnehmenden Anteil Industrieholz aufgrund des steigenden Verhältnisses beim Preis von Energie- zu Industrieholz. Entscheidend ist hier, inwiefern sich der Preis für Industrieholz dem verringerten Angebot anpassen kann. Diese Konkurrenzsituation wird bei einer Verschiebung in Richtung Laubwald deutlich entschärft, allerdings zu Lasten des Stammholzes. Steigende Preise für Energieholz führen zu einer Ausweitung des Angebots an Schwachholz zu Lasten des Stammholzes. Dabei ist zu beachten, dass diese Entwicklung aufgrund einer Zunahme bei den Preisen für Stammholz (je nach Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien) auch zu einer verstärkten Holzernte führen kann. Die steigenden Preise beim Energieholz führen dazu, dass sich der Zuwachs bei der Energieholznutzung mit der Zeit abflacht. Beim Waldenergieholz, d.h. dem Segment mit dem grössten noch nicht genutzten Potenzial, ist zu erwarten, dass bis circa 2035 das heute geschätzte Potenzial im Wesentlichen erreicht bzw. ausgeschöpft wird.

Vorratsentwicklung

Mit der im Modell unterstellten Basis-Entwicklung sowie in den untersuchten Extrem-Szenarien und Umfeldern nimmt der Vorrat weiterhin leicht zu. Eine Vorratsabnahme und eine Stabilisierung auf einem tieferen Niveau sind daher erst zu erwarten, wenn entweder weitergehende Massnahmen ergriffen werden oder wenn sich die Rationalität in der

Holznutzung grundlegend verändert. Zu solchen weitergehenden Massnahmen würden beispielsweise dauerhafte Veränderungen auf der Nachfrageseite gehören. Allerdings gilt hier die Einschränkung, die bereits in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten gemacht wurde.

Anteil stoffliche Nutzung

In Übereinstimmung mit der heute massgeblichen Rationalität in der Holznutzung hat im Modell die stoffliche Nutzung (Stammholz, Industrieholz) gegenüber der energetischen Nutzung grundsätzlich Priorität. Dies gilt allerdings nur solange die Preise für Energieholz nicht deutlich höher als diejenigen für Stammholz und Industrieholz liegen. Der seit 1990 zu beobachtende leichte Trend zugunsten der nicht-stofflichen (energetischen) Nutzung setzt sich im Basis-Szenario aufgrund der steigenden Anzahl von Holzfeuerungsanlagen weiter fort. In diesem Szenario würde sich demnach der Anteil der stofflichen Nutzung von rund 60% (1990) auf rund 50% (2050) reduzieren und etwa auf diesem Niveau verbleiben. Diese Aussage trifft auch auf die beiden untersuchten Handlungsoptionen zu. Der Anstieg der Preise für fossile Energie dagegen würde den Anteil der stofflichen Nutzung auf ein Niveau von rund 45% weiter reduzieren.

Die Annahme, dass die heutige Rationalität in der Holznutzung (Nutzholz als Leitsortiment für die Holznutzung) weiter besteht, stellt eine der massgeblichen Grenzen für das vorliegende Modell dar. Dies hat unter anderem auch zur Folge, dass die Holzernte ausschliesslich für eine sehr grosse Wirtschaftlichkeit beim Stammholz maximale Werte annimmt. Dies würde sich erst grundlegend ändern, wenn die Holzernte massgeblich durch die Energieholzpreise bestimmt würde bzw. die Holzwirtschaft stark gefördert würde. Zwar hat der Energieholzpreis bereits in der aktuellen Modellversion einen Einfluss auf die genutzte Holzmenge, stellt aber insgesamt nicht die zentrale Einflussgrösse dar. In diesem Sinn bildet das Modell das „System Holznutzung Schweiz“ ab, wie es sich heute darstellt.

Eine Weiterentwicklung des Modells müsste daher insbesondere die Erweiterung der Rationalität bei der Holznutzung beinhalten, d.h. eine Verschiebung hin zu einer verstärkten Nutzung des Waldes aus energetischen Gründen oder auch den Aufbau vermehrter Verarbeitungskapazitäten für Laubholz. Weiter müssten die Auswirkungen einer abgestimmten Förderung auf der Angebots- und auf der Nachfrageseite vertieft untersucht werden. Diese Fragestellungen betreffen damit das „System Holznutzung“ beziehungsweise dessen Veränderung in einem weiteren Sinn.

1. Einleitung

Fragestellung und Projektziel

Das übergeordnete Ziel des Projekts bestand darin, Entscheidungsgrundlagen für die Beurteilung verschiedener Optionen bei der Holznutzung im Kanton Luzern zu erarbeiten. Diese Grundlagen sollten durch ein dynamisches Simulationsmodell geliefert werden, welches in Zusammenarbeit mit den beteiligten Akteuren erstellt werden sollte.

Die Motivation für dieses Projekt war insbesondere darin begründet, dass Holz als CO₂-neutraler und erneuerbarer Rohstoff und Primärenergieträger wieder an Bedeutung gewonnen hat. Gleichwohl stellt Holz eine begrenzte Ressource dar, um die sich ein immer stärkerer Wettbewerb abzeichnet. Insbesondere stehen die stoffliche und die energetische Verwendung in gegenseitiger Konkurrenz (Ressourcenpolitik Holz BAFU 2008). Die Ressourcenpolitik Holz steht im Schnittpunkt mehrerer Politikbereiche. Dabei entstehen auch potenzielle Konfliktfelder, etwa zwischen Ressourcenpolitik Holz (Kaskadennutzung) und Energiepolitik (energetische Verwertung, Einspeisevergütung), oder zwischen Klimapolitik (Wald als CO₂-Senke) und Nutzung des Waldes als Ressource.

Der Kanton Luzern verfügt über grosse Waldressourcen, sowie über eine Anzahl grosser industrieller Anlagen, welche auf die stoffliche und energetische Nutzung der Ressource Holz angewiesen sind (Kronospan, Perlen). Aus energiepolitischen Gründen hat die energetische Nutzung von Holz an Bedeutung gewonnen. Es stellte sich daher die Frage, welches die Auswirkungen einer verstärkten energetischen Holznutzung sind.

Vor diesem Hintergrund stellte sich für den Kanton Luzern die Frage, welches die Auswirkungen verschiedener Holznutzungsstrategien auf die stoffliche und energetische Verwertung sind. Diese Grundlagen sollten transparent und für die Entscheidungsträger verständlich sein, und sie sollten Bezug nehmen auf das Wissen und die von den beteiligten Akteuren favorisierten Lösungen.

Bereits das Vorprojekt hat allerdings gezeigt, dass die Systemgrenzen über den Kanton Luzern hinaus gezogen werden müssen, weil die entsprechenden Stoffströme gesamtschweizerisch und international sind und auch kaum Daten über die interkantonalen Ströme vorliegen. Das Modell nimmt daher Bezug auf die Ebene Schweiz und die präsentierten Resultate beziehen sich jeweils auf die ganze Schweiz.

Modellzweck

Das Ziel der vorliegenden Arbeit und der Modellzweck des Simulationsmodells bestehen in den folgenden Punkten:

- Erarbeiten eines Simulationsmodells, welches auf der Basis der relevanten Wirkungsmechanismen die Beurteilung verschiedener Optionen bei der Holznutzung im Kanton Luzern (und in der Schweiz) erlaubt.
- Nutzen des Simulationsmodells zur Aufarbeitung und Darstellung der vorhandenen Daten (Lager, Ströme, zeitliche Veränderungen) über die Holznutzung im Kanton Luzern und in der Schweiz
- Gemeinsames Verständnis über die wichtigsten Prozesse und deren Einflussfaktoren unter den beteiligten Akteuren bewirken.

Zu untersuchende Strategien und Handlungsoptionen

Die zu untersuchenden Strategien und Handlungsoptionen beziehen sich einerseits auf die Forstwirtschaft und andererseits auf die Holznutzung. Bei der Forstwirtschaft sind es im Wesentlichen zwei Handlungsoptionen, die hier berücksichtigt werden, Fördermassnahmen bei der Holzernte sowie Veränderungen bei der Zusammensetzung der Hauptbaumarten. In Bezug auf die Holznutzung wird die Auswirkung einer verstärkten energetischen Nutzung untersucht. Dabei handelt es sich nicht um eine direkte Förderung, sondern vielmehr um die Untersuchung der Auswirkung einer verstärkten energetischen Nutzung aufgrund der Entwicklung bei den Wärmegestellungskosten bzw. eines starken Zubaus von Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlagen (WKK-Anlagen).

Exogene Rahmenbedingungen und Umfeld

Eine massgebliche Rahmenbedingung für die Holzwirtschaft stellt die Entwicklung auf dem internationalen (europäischen) Holzmarkt dar. Dies bezieht sich einerseits auf die Preisentwicklung beim Säge-Rohholz (Rundholz) wie auch beim Schnittholz. Letztere ist massgeblich für den Import an Halbfabrikaten in die Schweiz. In Bezug auf die energetische Verwertung stellt die Entwicklung der Wärmegestellungskosten durch fossile Energieträger die massgebliche Rahmenbedingung dar.

2. Methodisches Vorgehen

System Dynamics als Methode

Für die Untersuchung der verschiedenen Holznutzungsszenarien wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches auf der Grundlage der als wesentlich erachteten Wirkungsmechanismen die zeitliche Entwicklung bei der Nutzung der verschiedenen Holzsortimente berechnet.¹ Die Methode zur Erstellung und zur Analyse des Modells beruht auf einem Vorgehen, welches als „System Dynamics“ bekannt ist.² Dabei werden die massgeblichen Wirkungszusammenhänge analysiert („Kausalmodelle“) und darauf basierend ein quantitative Simulationsmodell erstellt.

Einbezug von Fachexperten

Der Einbezug von Fachexperten ist für dieses Vorgehen in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung: bei der Problembeschreibung, bei der Identifikation des vorhandenen Wissens und schliesslich bei der Validierung der Ergebnisse. Zu diesem Zweck haben mehrere Treffen mit Holzakteuren aus dem Kanton Luzern stattgefunden.³

Ergebnisse des Vorprojekts

Im Rahmen des Vorprojekts wurde eine Literaturübersicht erstellt und die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Übersicht zusammengefasst. Weiter wurde im Rahmen eines Workshops mit vier grossen Unternehmen (Tschopp Holz AG, Schilliger, Kronospan, Perlen) versucht, die Datenbasis für das Projekt zu verbessern und die massgeblichen Stoffflüsse zu ermitteln. Weiter sollte auch in Erfahrung gebracht werden, wie diese Unternehmen die wichtigsten Einflussfaktoren einschätzen. Im Vorfeld zu diesem Workshop wurde eine Besprechung mit Jost von Moos (Lenca AG) durchgeführt um die Aspekte des Holzmarktes besser zu verstehen. Auf der Basis dieser Unterlagen wurde ein erster Entwurf für ein Stoffstrommodell erstellt.

Die Arbeit an diesem Modell hat bereits gezeigt, dass – entgegen der ursprünglichen Absicht, ein integriertes Modell zu erstellen, das nach der Holzernte und der ersten Verarbeitungsstufe auch die weiteren Verarbeitungsstufen und die spätere Nutzung enthält – eine Beschränkung auf die ersten beiden Aspekte vorgenommen werden muss. Der Grund dafür liegt darin, dass das „System Holz Schweiz“ offen ist und zwar vor allem in Bezug auf den Import und Export von Halbfabrikaten und Endprodukten, sowie auch in Bezug auf den Export von Altholz.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Vorprojekts die geographische und inhaltliche Definition der Systemgrenzen angepasst (siehe Abbildung 1 und das folgende Kapitel 3).⁴

¹ Bei diesem Ansatz handelt es sich um ein so genanntes deterministisches Modell, bei dem alle Veränderungen durch eine Anzahl von Gleichungen bestimmt sind. Im Gegensatz dazu werden auch stochastische Modelle verwendet, in welchen sich die zeitliche Entwicklung aufgrund von zufälligen Prozessen ergibt (z.B. agentenbasierte Modelle).

² Literatur zu System Dynamics: John Sterman. Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. 2000. Boston, Mass. : Irwin/McGraw-Hill

³ Weitere wertvolle Informationen konnten aus Gesprächen mit David Walker (Interface) und Andreas Keel (Energie und Holz) gewonnen werden.

⁴ Die Ergebnisse des Vorprojekts sind in einem separaten Bericht dokumentiert, der aufgrund der Tatsache, dass darin unternehmensspezifische Daten vorhanden sind, nicht veröffentlicht wird.

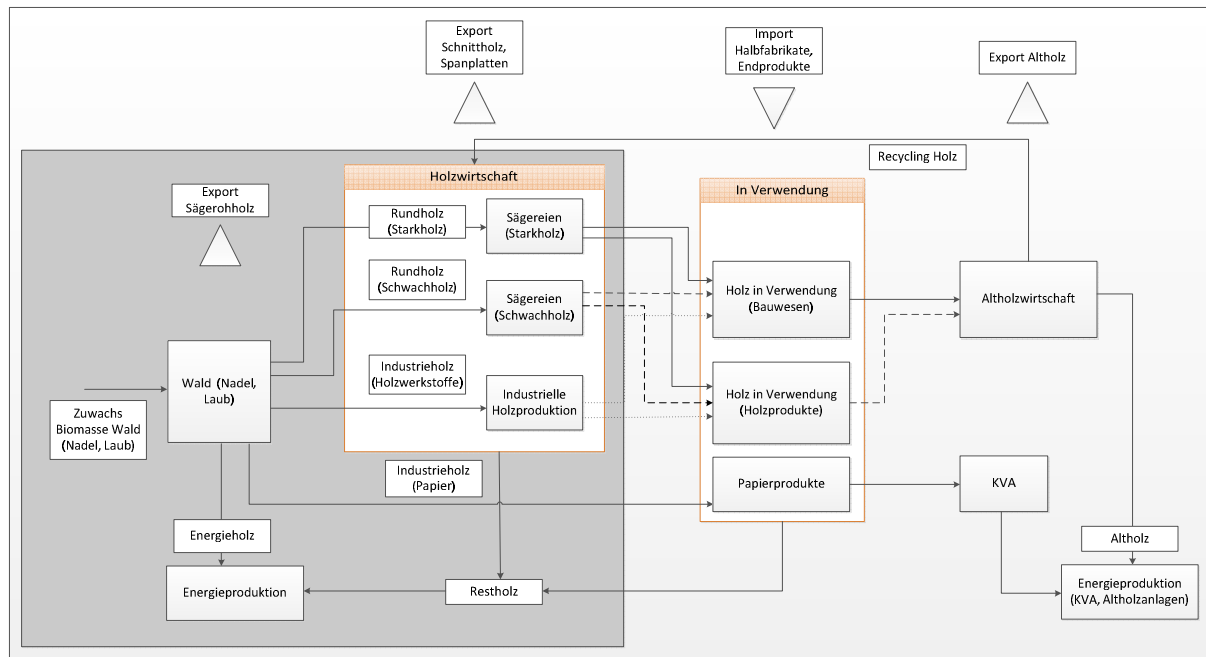


Abbildung 1: Überblick Stoffstrommodell mit Systemgrenze (graue Fläche bezeichnet die im Modell abgebildeten Prozesse).

3. Holzflussmodell im Kontext

Systemgrenzen

Wie bereits erwähnt, wurde die geografische Systemgrenze von der kantonalen Ebene auf die ganze Schweiz ausgedehnt. Die „inhaltliche“ Systemgrenze besteht darin, dass sich das Modell in Bezug auf die stoffliche Verwertung auf die erste Verarbeitungsstufe (Sägereien Schweiz und Produktion von Restholz aus der ersten Verarbeitungsstufe) beschränkt. Aufgrund der Tatsache dass der Markt Schweiz insbesondere für Halbfabrikate und Endprodukte offen ist, stammt ein bedeutender Teil des Rohholzes für später anfallendes Altholz (und Restholz) ursprünglich aus dem Ausland. Umgekehrt ist der Export von Stammholz, von Schnittholz und von Spanplatten aus der Schweiz von grosser Bedeutung.

Diese Einschränkung wurde vor allem deshalb vorgenommen, weil der Fokus der Fragestellung auf der Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Verwendung gelegen hat. Vor diesem Hintergrund spielt die Frage, ob das Rohholz für die spätere Verwendung als Altholz aus der Schweiz oder aus dem Ausland stammt, eine untergeordnete Rolle.

Der Markt für Restholz und für Altholz wird nicht modelliert. Die für energetische Zwecke genutzten Mengen Restholz und Altholz werden als exogen betrachtet.⁵

Kaskadennutzung

Der Begriff der Kaskadennutzung bezeichnet einerseits die Mehrfachnutzung von Holz, also zunächst eine (oder mehrere) stoffliche Nutzung(en) und anschliessend eine energetische Nutzung. Andererseits wird damit eine Holznutzung bezeichnet, bei welcher das geerntete Holz so verwertet wird, dass jeweils die grösste Wertschöpfung erzielt werden kann. Dies bedeutet, dass bei der Holznutzung dem jeweils „höherwertigen“ Sortiment der Vorrang gegeben wird. Damit würde sich eine Priorität von Stammholz über Industrieholz zu Energieholz ergeben. Die Kaskadennutzung ist im Modell in diesem Sinn implementiert und entspricht daher der heute zu Grunde liegenden Rationalität in der Holznutzung. Weitergehende Veränderungen in der Holznutzung, welche zu einer massgeblichen Modifikation dieser Kaskadennutzung führen würden, sind in Kapitel 12 (Weiterentwicklung) diskutiert. Als wichtiger Indikator für diesen Aspekt wird der Anteil der stofflichen Nutzung an der gesamten Holznutzung ausgewiesen (vgl. Kapitel 8).

Annahmen über zukünftige Rahmenbedingungen und Entwicklungen

Für eine Anzahl wichtiger Rahmenbedingungen und zukünftiger Entwicklungen müssen Annahmen getroffen werden. Für die vorliegende Arbeit gilt es folgende Aspekte zu charakterisieren: Energiepolitik, Forstpolitik und Forstwirtschaft, die Entwicklung in Bezug auf die Exportsituation, sowie die Holzverarbeitung in der Schweiz. Dabei geht es nicht um eine umfassende Darstellung, sondern nur darum, die für das Modell relevanten Aspekte zu beschreiben.⁶

⁵ Eine endogene Modellierung der Märkte für Restholz und für Altholz müsste in einem eigenen Projekt vorgenommen werden aufgrund der Komplexität der Fragestellung und der schwierigen Datenlage.

⁶ In diesem Projekt wird folgende Terminologie verwendet: Steuerungsmöglichkeiten werden als Handlungsoptionen oder Strategien bezeichnet, während die äusseren Rahmenbedingungen oder

Energiepolitik

Es wird eine Energiepolitik im Sinne der Energiestrategie 2050 mit einem Ausbau der erneuerbaren Energien nach Massgabe von deren Potenzialen verfolgt. Im Grundsatz besteht keine Förderung für Holzenergie, ausser durch die KEV (unter Voraussetzung eines genügend hohen Gesamtwirkungsgrads). Es wird ein Anstieg des Energiepreises aufgrund von Massnahmen im Zusammenhang mit dem CO₂ bzw. eine längerfristige Einführung einer Energieabgabe oder Energiesteuer erwartet. Dieser Preisanstieg wird im Rahmen von verschiedenen „Umfeldern“ berücksichtigt.

Forstpolitik und Forstwirtschaft

Die aktuelle Forstpolitik mit einer längerfristigen Verschiebung des Anteils Laubholz zu Lasten des Nadelholzes wird weitergeführt. Als Massnahme bzw. Handlungsoption wird die Förderung der Holznutzung auf Flächen mit hohen Erntekosten untersucht (z.B. Seilkranbeiträge). Stammholz bleibt weiterhin das für die Holznutzung bestimmende Sortiment.⁷ In diesem Sinn werden Industrie- und Energieholz als Koppelprodukt der Stammholznutzung betrachtet. Im Modell wird untersucht, wie sich eine Verschiebung des Anteils Laubholz und die Förderung der Holznutzung auswirken.

Exportsituation

Der Exporterlös wird massgeblich durch den Wechselkurs beim Euro bestimmt. Insgesamt gehen 95% der Ausfuhren von Holz und Holzprodukten in die EU. Die Wirtschaftlichkeit beim Stammholz wird im Rahmen von verschiedenen „Umfeldern“ berücksichtigt.

Holzverarbeitung in der Schweiz

Es wird davon ausgegangen, dass die Holzverarbeitungskapazitäten in der Schweiz weiterhin auf Nadelholz ausgerichtet sind und keine nennenswerten Kapazitäten für Laubholz aufgebaut werden. Bei den Kapazitäten für die Produktion von Span- und Faserplatten wird von einer konstanten Nachfrage ausgegangen.⁸

Entwicklungen als Umfeld bezeichnet werden. Die im Modell berechneten zeitlichen Entwicklungen (Szenarien) sind daher das Resultat bestimmter Strategien in einem bestimmten Umfeld.

⁷ Diese Annahme könnte sich in Zukunft auch ändern, so dass der Wald vermehrt genutzt wird, um Energieholz zu gewinnen (siehe Abschnitt 12).

⁸ Diese Annahme könnte im Sinne einer Weiterentwicklung später fallen gelassen werden (siehe Abschnitt 12).

4. Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die verwendeten Datengrundlagen diskutiert. Dabei wird unterschieden zwischen der Ebene Schweiz, dem Kanton Luzern sowie den Unternehmen.

Schweiz

Die Datengrundlagen auf Ebene Schweiz im Zusammenhang mit Wald und Holznutzung sind umfangreich. Die wichtigsten hier verwendeten Grundlagen sind:

- Landesforstinventar LFI (Auswertungen <http://www.lfi.ch> und LFI Ergebnisbericht 2010)
- Forststatistik (Jahrbuch Wald und Holz 2012)
- Jahrbuch Wald und Holz 2012
- Holzbilanz Schweiz (Jahrbuch Wald und Holz 2012)
- Holznutzungspotenziale Schweiz (Hofer et al. 2011)
- Differenzen Holznutzungsmenge zwischen Forststatistik und LFI Holzenergiestatistik (Altweg et al. 2010)
- Potenzialstudien Holzenergienutzung (Rutschmann 2012, Keel 2012)

Nutzung Holz

Für die gesamte genutzte Holzmenge wird auf das LFI abgestützt, bzw. auf die Holzbilanz Schweiz. Dies bedeutet insbesondere dass gegenüber der Forststatistik von einer höheren genutzten Menge ausgegangen wird. Für das Jahr 2011 bedeutet dies beispielsweise folgendes:⁹

	Total	Stammholz	Übrige Sortimente	
	1000 m ³ /a	1000 m ³ /a	1000 m ³ /a	
LFI	6905	k.A.	k.A.	LFI
Holzbilanz Schweiz	6160	3139	3021	Jahrbuch 2012 Tab. 13.1
Forststatistik	5075	2826	2249	Jahrbuch 2012 Tab. 4.1

Tabelle 1: Holznutzung Schweiz, Vergleich LFI, Holzflussbilanz, Forststatistik

Das LFI bestimmt die Abgänge (Nutzung und natürliche Mortalität) zwischen zwei Inventuren wobei die Mengen als Schaftholz in Rinde angegeben werden. Die Holzbilanz gibt die gesamte Holzmasse an, die „aus dem Wald in den Wirtschaftskreislauf gelangt – inklusive Rinde, Zumass beim Stammholz oder statistisch nicht erfasste Kleinstmengen (Jahrbuch 2012).“ Die Holzbilanz wird demnach ohne die Ernteverluste berechnet, für die jeweils ein Anteil von rund 12% eingesetzt wird. Mit dieser Korrektur stimmen LFI und Holzbilanz Schweiz in der Grössenordnung überein. Die Forststatistik gibt die Holzmengen an, die in einem Jahr verkauft oder im Eigenverbrauch verwendet wurden (Liegendmass). Stammholz wird gemäss Altweg et al. (2010) ohne Rinde erfasst. Altweg et al. (2010) schlagen für den Rindenanteil beim Stammholz einen Korrekturfaktor 12.3% vor. Weitere Korrekturfaktoren zur Klärung der Differenzen zwischen Forststatistik und LFI umfassen gemäss Altweg et al. (2010) den Eigenbedarf der privaten Waldeigentümer, nicht erfasste Mengen aus dem öffentlichen Wald, sowie Mengeneffekte der Messvorschriften. Gesamthaft wird gegenüber der Forststatistik ein Korrekturfaktor von 29.2% vorgeschlagen, um einen „wahren Wert“ der Holznutzung in der

⁹ LFI: Durchschnitt der Jahre 2004/06 – 2009/11 (LFI3-LFI4a).

Schweiz zu erhalten (vgl. Abbildung 2). Gemäss Altweg et al. (2010) sollte ein Korrekturfaktor von – 5.7 % auf den durch das LFI ausgewiesenen Wert angewendet werden.

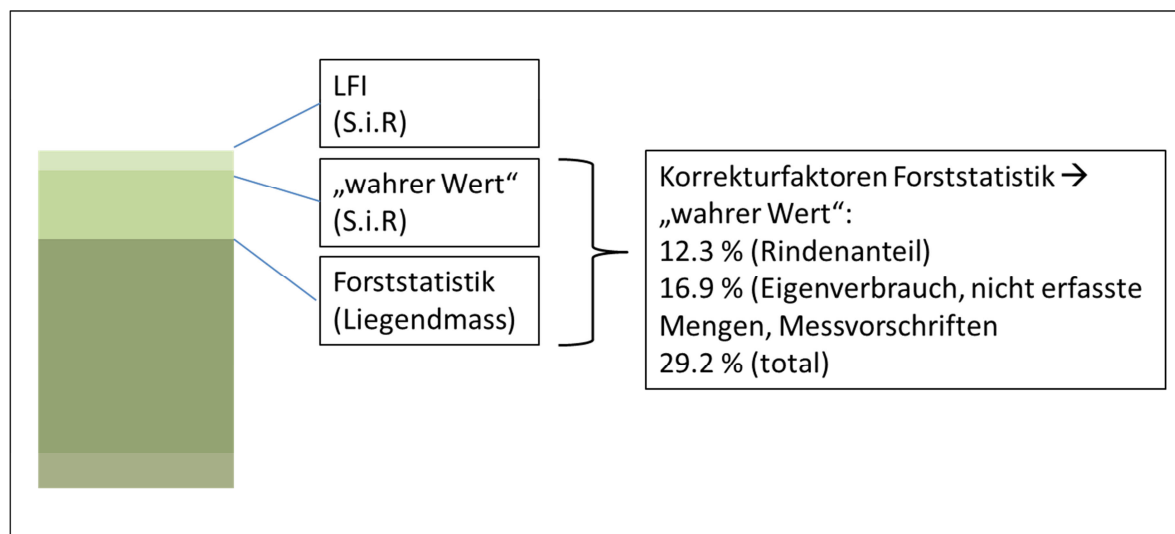


Abbildung 2: Forststatistik, LFI und "wahrer Wert" der Holznutzung

Maximales Potenzial Energieholznutzung

Um einen Überblick über das maximal mögliche Potenzial an Energieholz zu gewinnen, wird hier Bezug genommen auf Keel (2012). Demnach sieht die Situation in der Schweiz folgendermassen aus:

	Nutzung 2010	Potenzial brutto	Potenzial netto
	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a	Mio. m ³ /a
Waldholz	2.23	4.29	2.06
Flurholz	0.32	0.70	0.38
Restholz	1.06	1.25	0.19
Altholz	0.75	1.32	0.57
Total	4.36	7.56	3.20

Tabelle 2: Energieholzpotenzial

Aus dieser Gegenüberstellung zeigt sich, dass vor allem beim Waldholz noch ein Potenzial vorhanden ist und zu einem geringeren Anteil beim Altholz. Das Brutto-Potenzial beim Waldholz wurde berechnet aus einer maximal möglichen Holznutzung¹⁰ und einem Anteil Energieholz von 31% beim Nadel- und von 62% beim Laubholz. Das hier ausgewiesene totale Potenzial dürfte eher an der oberen Grenze liegen. Manser (2010) und Rutschmann (2012) gehen von einem Potenzial von 6.3 Mio. m³/a aus. Die massgebliche Differenz zu Keel (2012) liegt beim Waldholz, bei welchem ein Potenzial von 3.1 Mio. m³/a ausgewiesen wird (Rutschmann 2012). Nussbaumer (2013) verweist auf eine noch unveröffentlichte Studie von Thees et al. (2013), welche von einem Potenzial von 7.3 Mio. m³/a ausgeht. In der Grössenordnung sind das Gesamtpotenzial, und damit die Möglichkeit, die Energieholznutzung weiter auszubauen, unbestritten.

¹⁰ Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald, Szenario D (grosse Nachfrage mit maximal möglicher Nutzung), Zeitraum 2007-2036

Kanton Luzern

Für den Kanton Luzern liegen die Datenreihen der Holznutzung 1987-2011 vor (lawa) sowie Ergebnisse des NRP-Projekts „Luzern-Energie“ (Teilprojekt „Potenziale erneuerbare Energien“ Holzenergie). Damit sind folgende Informationen verfügbar:

- Holznutzung im Kanton Luzern (Forststatistik)
- Kantonale Auswertung der Schweizer Holzenergiestatistik (Anlagenbestand, installierte Leistung, jährliche Nutzenergieerzeugung sowie jährlicher Holzverbrauch der Holzheizungen im Kanton Luzern per 31. Dezember 2008)
- prozentuale Zuteilung der verschiedenen Energieholzsortimente (Wald-, Rest-, Altholz) zu den verschiedenen Anlagenkategorien
- Energieholznutzung 2008 im Kanton Luzern, verteilt auf die verschiedenen Anlagenkategorien und die verschiedenen Brennstoffsortimente
- Vergleich der Ergebnisse des NRP-Projekts „Luzern-Energie“ (Teilprojekt „Potenziale erneuerbare Energien“ Holzenergie) mit den Aussagen im Energiekonzept des Kantons Luzern von 2007
- Abschätzungen für die noch verfügbaren Potenziale im Kanton Luzern
- Informationen über die Altholzverwertung im Kanton Luzern (uwe, LUSTAT 2012)
- Informationen über die Verwendung von Holz für Prozessenergie in den holzverarbeitenden Unternehmen (uwe)
- Statistiken des BFS für die Forstwirtschaft und die holzverarbeitende Industrie nach Kantonen aufgeschlüsselt (u.a. Rundholzeinschnitt in Sägereien nach Kantonen bzw. nach Grössenklassen, Restholz in Sägereien nach Kantonen bzw. nach Grössenklassen).
- Gemäss der Forststatistik Kanton Luzern wird im Kanton Luzern rund 300'000 m³/a genutzt (Durchschnitt der Jahre 1987 – 2011). Der jährliche Zuwachs wird gemäss LFI mit 550'000 m³/a angegeben. Davon sind rund 12% Schlagabraum (Ernteverluste) und 15% Totholz (Mortalität). Damit ergibt sich eine nutzbare Holzmenge von rund 400'000 m³/a. Bei der nutzbaren Menge ist zu beachten, dass gemäss aktueller Waldpolitik ca. 10 % der Waldfläche (Waldreservate inkl. Flächen, auf denen gemäss FSC-Zertifizierung freiwillig auf eine Nutzung verzichtet wird) nicht genutzt werden können, weitere 5-10% der Flächen nicht oder nur soweit erschlossen sind, dass mit den aktuellen Holzmarktpreisen keine kostendeckende Holznutzung möglich ist. Von der genutzten Menge von total 300'000 m³/a sind 67% Stammholz, 19% Energie- und 14% Industrieholz.
- Beim Potenzial für Energieholz im Kanton Luzern wird auf das Projekt „Luzern-Energie“ verwiesen (Keel 2009), welches im Wesentlichen auf die gleichen Ergebnisse kommt wie auf gesamtschweizerischer Ebene, wonach nur beim Waldenergieholz noch bedeutende bisher nicht genutzte Potenziale vorhanden sind (Tabelle 3). Dabei wird das Waldholzpotenzial berechnet aus Energieholzmenge pro ha und Jahr (6,5 m³/ha/Jahr für Mittelland und 2,1 m³/ha/Jahr für die Voralpen). Das Potenzial total in Tabelle 3 entspricht dem Potenzial ohne Vorratsabbau.¹¹

¹¹ Beim Energieholz steht der geschätzten genutzten Menge von 135'000 m³/a gemäss Projekt „Luzern Energie“ eine Erntemenge von 64'000 m³/a gemäss Forststatistik gegenüber.

Kategorie	Potenzial total	Nutzung 2008	Potenzial noch verfügbar
	(m ³ /a)	(m ³ /a)	(m ³ /a)
Waldholz	260'000	135'000	125'000
Restholz	100'000	90'000	10'000
Altholz	95'000	95'000	0
Total	455'000	320'000	135'000

Tabelle 3: Potenziale Energieholz Kanton Luzern

Unternehmen

Die Stoffflussbilanzen von vier Unternehmen mit grossem Holzverbrauch in der Region Luzern sind im Bericht zum Vorprojekt dargestellt. Da in dieser Zusammenstellung unternehmensspezifische Daten vorhanden sind, werden sie in diesem Bericht hier nicht veröffentlicht.

5. Modellstruktur

Aufbau

Der Aufbau des Modells ist aus Abbildung 3 ersichtlich. Es besteht aus fünf Modulen, die im Folgenden beschrieben werden. Die im Modell verwendeten Parameter werden im Anhang erläutert.

Modul 1: Vorratsentwicklung und Holznutzung

In Modul 1 werden die Vorratsentwicklung und die Holznutzung sowie die Mortalität berechnet. Dabei wird unterschieden zwischen Nadel- und Laubholz sowie der Nutzung von Starkholz nach Ablauf der Umtriebszeiten und von schwachem und mittlerem Baumholz aus der periodischen Durchforstung. Das Modell lässt die Simulation von längerfristigen Verschiebungen zwischen Flächen mit Nadel- und Laubholz zu. Der Anteil der Waldfläche, die nicht für die Holzernte genutzt wird, ist abhängig vom Preis beim Stammholz, sowie von der Förderung für die Holzernte auf Flächen mit hohen Holzerntekosten.

Modul 2: Holzsortimente

In Modul 2 werden unter Berücksichtigung der Ernteverluste und der für die jeweiligen Sortimente nutzbaren Anteile die Ernte an Stammholz sowie das Potenzial für Energie- oder Industrieholz („Schwachholz“) berechnet. Es wird damit unterschieden zwischen den Sortimenten Stammholz (Säge-Rohholz aus starkem, mittlerem und schwachem Baumholz) sowie „Schwachholz“, wobei letzteres Energie- und Industrieholz umfasst. Mit steigendem Energieholzpreis wird ein kleinerer Anteil des mittleren und schwachen Baumholzes als Stammholz genutzt.

Modul 3: Energie- und Industrieholz

In Modul 3 wird aufgrund des aktuellen Preises für Energieholz berechnet wie viel Schwachholz genutzt wird, bzw. umgekehrt wie viel von diesem Potenzial im Wald liegen gelassen wird. Weiter wird darin der Anteil des als Industrieholz genutzten Schwachholzes berechnet aufgrund des Vergleichs zwischen Energieholzpreis und dem (exogenen) Preis für Industrieholz. Die Nachfrage nach Industrieholz wird als exogen gegeben betrachtet.¹²

Modul 4: Nutzung und Verarbeitung Stammholz

In Modul 4 werden Angebot an Stammholz (Säge-Rohholz), Kapazität der Sägereien und Preis Stammholz dynamisch verknüpft. Der Export von Stammholz reagiert dynamisch auf das Angebot von Stammholz und wirkt als „Ventil“, um Angebot und Nachfrage Schweiz auszugleichen. Der Einfluss unterschiedlicher Wettbewerbssituationen mit dem Ausland wird berücksichtigt über den Vergleich zwischen dem Preis für Stammholz Schweiz und einem exogenen Preis für Stammholz Ausland. Dieser exogene Preis für Stammholz Ausland kann variiert werden, um so den Einfluss einer sich verändernden Marktsituation zu untersuchen. Der Preis von Stammholz Schweiz wird berechnet aus dem Angebot Stammholz Schweiz und der Nachfrage der Schweizer Sägereien unter Berücksichtigung des Exports. Dieser Preis beeinflusst

¹² Eine mögliche Weiterentwicklung des Modells würde darin bestehen, die Nachfrage nach Industrieholz dynamisch mit dem Preis für Industrieholz zu verknüpfen.

massgeblich die Holznutzung (Modul 1) und zwar sowohl die Nutzung von Starkholz wie auch die Durchforstung.

Modul 5: Energieholznutzung

In Modul 5 wird die Nutzung von Energieholz berechnet. Dabei wird die Entwicklung von automatischen Holzfeuerungsanlagen endogen im Modell berechnet, während die Abnahme bei den Stückholzfeuerungen sowie die Zunahme bei WKK-Anlagen exogen vorgegeben werden. Unter Annahme des für Energiezwecke eingesetzten Restholzes (exogen) wird ein Preis für Energieholz berechnet, welcher die Wärmegestehungskosten für die automatischen Feuerungsanlagen bestimmt.¹³ Aufgrund von diesen Wärmegestehungskosten, im Vergleich zu denjenigen einer fossilen Feuerung, sowie aufgrund des verfügbaren Energieholzpoteziels wird der Zubau von Anlagen berechnet. Der Energieholzpreis beeinflusst weiter das Potenzial Energie- und Industrieholz („Schwachholz“) sowie den Anteil dieses Sortiments, das als Industrieholz genutzt wird. In diesem Sinn bildet das Modell den Ansatz der Kaskadennutzung ab, indem von diesem Schwachholz zunächst die Nachfrage nach Industrieholz befriedigt wird, solange sich der Preis des Energieholzes und derjenige des Industrieholzes nicht „zu stark“ unterscheiden.¹⁴

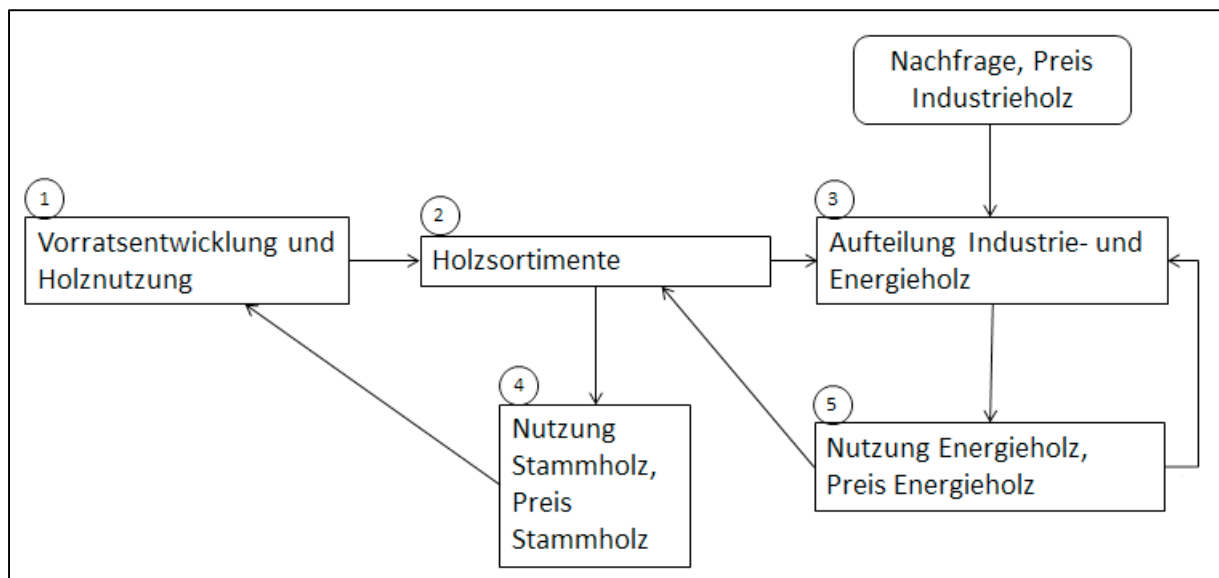


Abbildung 3: Aufbau des Modells im Überblick

¹³ Die Annahme eines exogenen Inputs an Restholz wird dadurch begründet, dass das Potenzial an Restholz für die energetische Verwertung weitgehend ausgeschöpft ist und das Angebot an Restholz daher kaum einer endogenen Veränderung unterliegt.

¹⁴ Der Grund für diesen Sachverhalt liegt im Wesentlichen darin, dass lokal ein Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage bestehen kann. Wenn viel Holz in einer Region vorhanden ist und eine entsprechende Nachfrage nach Industrieholz besteht, wird dieses Holz als Industrieholz genutzt, auch wenn der Preis für Energieholz attraktiver wäre. Hier spielen die Transportkosten eine wichtige Rolle, indem sie die Reichweite für die Transporte und damit einen allfälligen Ausgleich von Angebot und Nachfrage limitieren (vgl. dazu auch die Ausführungen zur Modellvalidierung in Abschnitt 7 und zur Weiterentwicklung des Modells in Abschnitt 12).

Zeithorizont des Modells

Das Modell umfasst einen Zeithorizont von 1990 – 2050.¹⁵ Damit kann der Zeitraum von 1990 – 2010 zur Modell-Kalibrierung verwendet werden. Das Modell berechnet die zeitliche Entwicklung in Jahresschritten.

Grundlegende Annahmen

In Tabelle 4 werden die grundlegenden Annahmen im Modell zusammenfassend erläutert und beurteilt. Die Beurteilung erfolgt aufgrund des Einflusses auf die Validität des Modells (1: Einfluss gering, 2: Einfluss mittel, 3: Einfluss hoch). Ein *geringer Einfluss* bedeutet, dass dieser Aspekt im Wesentlichen vernachlässigt werden kann. Annahmen, welchen einen *mittleren Einfluss* auf die Gültigkeit des Modells bedeuten, müssten in der Weiterentwicklung des Modells vertieft untersucht werden, wobei zu erwarten ist, dass sich daraus keine grundlegend anderen Aussagen ergeben dürften. Annahmen, denen ein *grosser Einfluss* zugeschrieben wird, lassen dagegen qualitativ und quantitativ bedeutende Änderungen erwarten und müssen bei der Beurteilung der Schlussfolgerungen entsprechend berücksichtigt werden.

¹⁵ Zur Überprüfung des Modellverhaltens wurde in der Validierung auch der Zeitraum bis 2100 berücksichtigt. Die Modellergebnisse werden jedoch jeweils bis 2050 dargestellt.

Annahme	Kommentar	Wertung
Die Holznutzung wird bestimmt durch das Stammholz (Säge-Rohholz als Leitsortiment). Nutzungen und Eingriffe werden gemacht, um Nutzholz zu ernten, nicht um Energieholz zu gewinnen. Bei steigendem Preis für Energieholz wird mehr mittleres Baumholz (Nadel) für Energiezwecke genutzt.	Diese Annahme ist unter aktuellen Bedingungen durchaus gerechtfertigt, in einem längeren Zeithorizont allerdings kritisch zu hinterfragen.	3
Es wird von einem gleichförmigen Hochwald ausgegangen, ohne gemischte Flächen Nadel- und Laubholz.	Rund 80% der Waldflächen und des Vorrats gehören zum Waldtyp „gleichförmiger Hochwald“. Rund zwei Drittel der Waldfläche sind reine Nadel- bzw. Laubwälder. Die vereinfachende Annahme, keine gemischten Wälder zu berücksichtigen, hat daher auf die Modellergebnisse einen geringen Einfluss.	1
Holz das in einem Jahr geschlagen, aber nicht verarbeitet wird, kann später nicht mehr genutzt werden (keine Lager)	Diese Annahme hat im Wesentlichen zur Folge, dass keine aussergewöhnlichen Ereignisse (Kalamitäten) berücksichtigt werden können. Damit wird z.B. der nach Lothar beobachtete starke Zubau bei den Holzfeuerungen vernachlässigt.	2
Export Stammholz	Der Export wird als Ausgleichsmechanismus behandelt, der sich am notwendigen Bedarf nach Stammholz (Säge-Rohholz) für die Sägereien in der Schweiz orientiert. In diesem Sinn reagiert der Export dynamisch auf Veränderungen beim Angebot und der Nachfrage nach Stammholz in der Schweiz.	1
Kapazität Sägereien reagiert dynamisch auf Preis Stammholz und Wirtschaftlichkeit im europäischen Kontext	Mit dieser Annahme sind verschiedene Konsequenzen verbunden: Sie bedeutet erstens, dass längerfristige strukturelle Veränderungen nicht berücksichtigt werden und Kapazitätsveränderungen daher reversibel sind. Zweitens kann keine (rein exogene) Veränderung der Kapazitäten vorgegeben werden, wie dies beispielsweise in Domat/Ems der Fall war. Drittens (weniger bedeutend) impliziert diese Annahme, dass Kapazität und Auslastung vereinfachend gleichgesetzt werden.	2
Zubau Holzheizkraftwerke (WKK) exogen vorgegeben	Unter dieser Annahme reagieren die Kapazitäten bei den Holzheizkraftwerken nicht dynamisch auf die Preise beim Energieholz. Dies dürfte eine Einschränkung der Gültigkeit des Modells in einem längerfristigen Zeithorizont bedeuten.	2
Keine wesentlichen Kapazitäten für die Verarbeitung von Laubholz in der Schweiz vorhanden	Diese Annahme stimmt mit der aktuellen Situation und wohl auch mit derjenigen in der näheren Zukunft überein. Der Aufbau von Verarbeitungskapazitäten für Laubholz in der Schweiz (oder im nahen Ausland) dürfte einen grossen Einfluss auf die Holznutzung in der Schweiz haben, ist aber nicht Gegenstand des Modells. Im Sinne einer Schlussfolgerung basierend auf der Modellanalyse kann aber eine Aussage darüber gemacht werden, ob eine Förderung eher auf der Angebots- oder auf der Nachfrageseite gemacht werden sollte (vergleiche dazu Abschnitt 10).	(3)

Tabelle 4: Annahmen

6. Basis-Szenario (Referenz-Szenario)

Definition

Das Basis-Szenario bzw. Referenz-Szenario beschreibt eine Situation, welche beim Stamm- und Industrieholz einem „Gleichgewicht“ entspricht. Dabei werden die Mittelwerte zwischen 2003 – 2011 (bzw. 2008) verwendet, d.h. ohne die Einflüsse von „Lothar“ zu berücksichtigen, aber auch ohne Berücksichtigung der Eurokrise. Letztere wird als so genanntes „Umfeld“ berücksichtigt und ihr Einfluss auf die Entwicklung wird gesondert untersucht (siehe Kapitel 8). Die Entwicklung beim Energieholz wird im Basis-Szenario dagegen dynamisch (endogen) berechnet und nicht als exogene Grösse berücksichtigt. Der Transparenz halber werden auch hier verschiedene Parameter konstant gehalten (u.a. Wärmegestehungskosten fossile Energie) und dann ebenfalls später als „Umfeld“ variiert. Der Anteil der wirtschaftlich genutzten Fläche Wald entspricht der heutigen Situation, d.h. unter Berücksichtigung der heutigen Beiträge an die Holzernte.

Resultate Basis-Szenario

Die Resultate für das Basis-Szenario werden für einen Zeitraum von 1990-2050 präsentiert, was auch einen Vergleich mit den historischen Daten von 1990 – 2010 erlaubt.

Zuwachs, Holznutzung, Vorrat

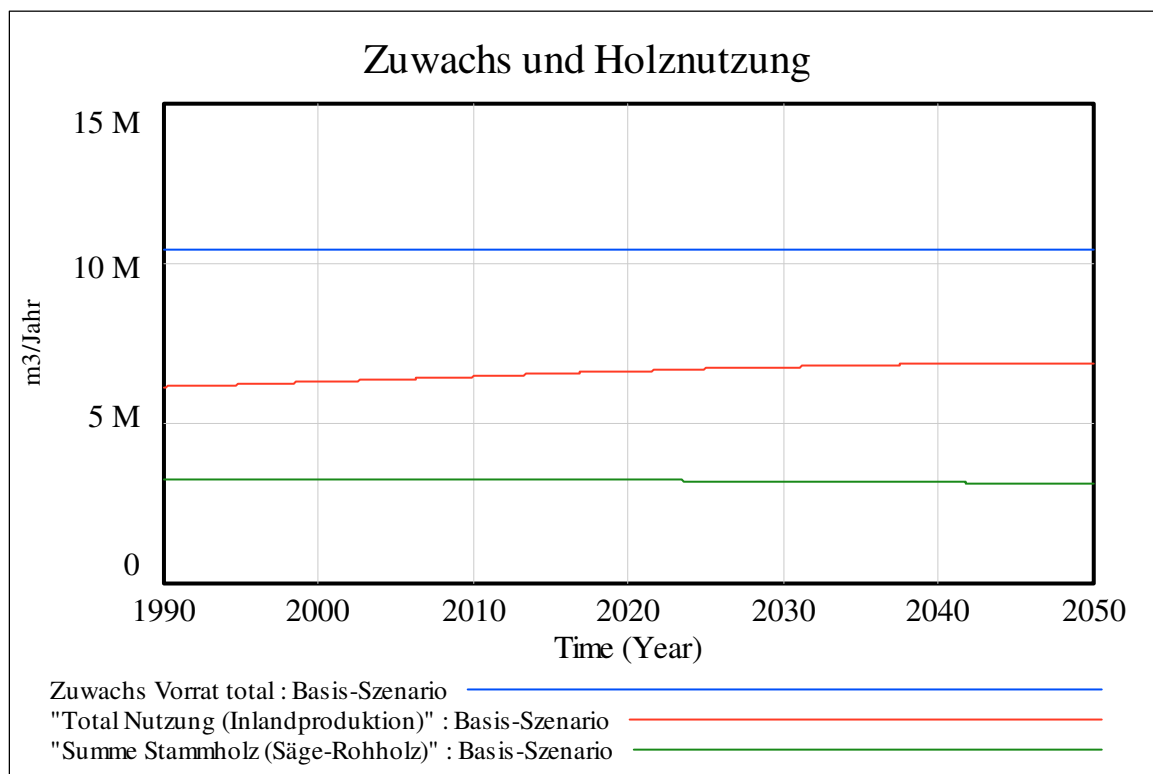


Abbildung 4: Basis-Szenario: Zuwachs, Nutzung total, Ernte Stammholz (inkl. Ernteverluste)

Abbildung 4 zeigt beim Basis-Szenario einen konstanten Zuwachs von total 10.4 Mio. m³/a, eine steigende Nutzung (Stammholz plus Schwachholz) und einen konstanten Wert bei der Nutzung von Stammholz. Dieser beträgt im Basis-Szenario rund 3.2 Mio. m³/a. Im Modell entspricht dies

einem Rohholzeinschnitt von 2.3 Mio. m³/a und einem Netto-Export von gut 0.9 Mio. m³/a.¹⁶ Unter „Nutzung total“ wird hier die geerntete Holzmenge nach Abzug der Ernteverluste bezeichnet. Diese Grösse entspricht in der Holzbilanz Schweiz der so genannten Holzernte (gesamte Holzmasse). Für das Jahr 2011 wird dafür ein Wert von 6.16 Mio. m³/a angegeben (Jahrbuch Wald und Holz 2012). Im Modell resultiert eine leichte Zunahme bei der gesamten Holznutzung von 1990 bis 2010 mit einem mittleren Wert von rund 6.2 Mio. m³/a. Dieser Zuwachs ist auf die gesteigerte Nutzung beim Energieholz zurückzuführen. Die Ernte an Industrieholz bleibt zwischen 1990 und 2010 konstant bei rund 0.5 Mio. m³/a (hier nicht dargestellt). Die leichte Abnahme beim Stammholz ist auf die steigenden Preise beim Energieholz zurückzuführen, wodurch mehr mittleres und schwaches Baumholz für energetische Zwecke genutzt wird.

Die gesamte Holzernte inklusive Ernteverluste beträgt rund 7.6 Mio. m³/a. Bei einem konstanten Zuwachs und einer (konstanten) Mortalität von 15% in Bezug auf diesen Zuwachs resultiert ein kleiner Vorratzzuwachs, in Übereinstimmung mit den Werten von LFI2 und LFI3 (Abbildung 5).

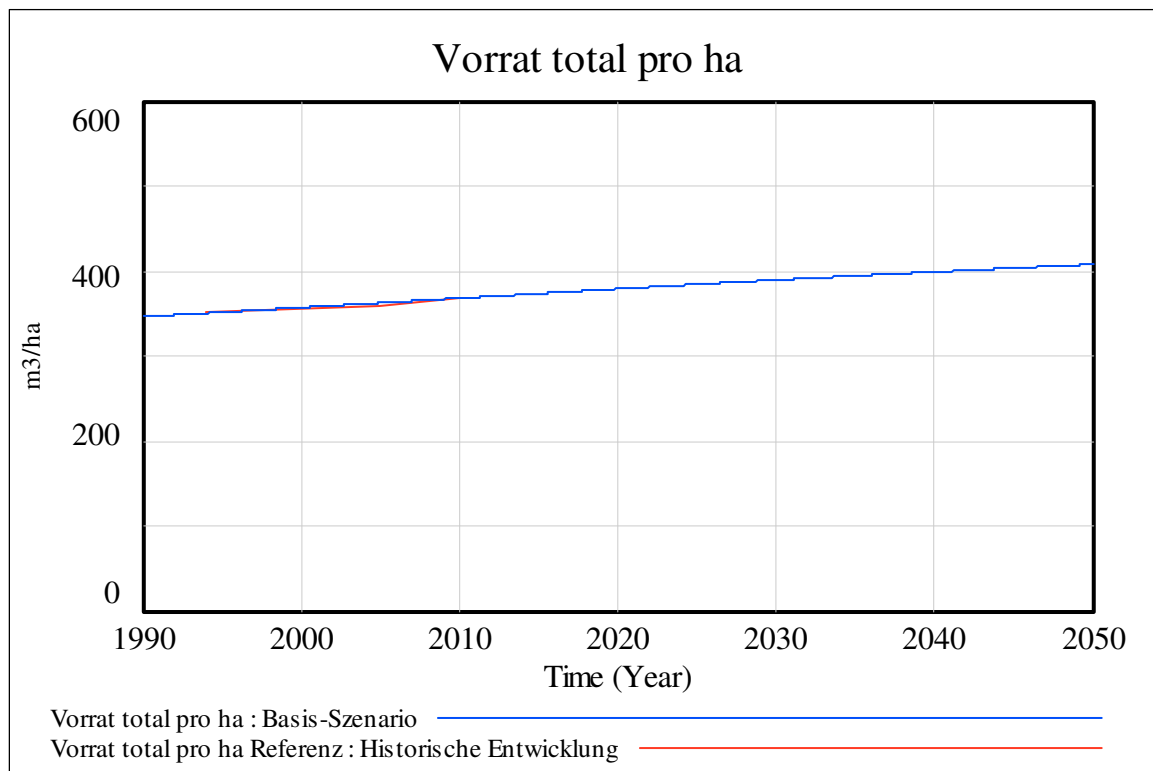


Abbildung 5: Basis-Szenario: Vorratsentwicklung (mit Vergleich zu LFI2, LFI3)

Energetische Nutzung

Bei der energetischen Nutzung resultiert ein steigender Verbrauch an Energieholz von rund 3 Mio. m³/a in 1990 auf rund 4.3 Mio. m³/a in 2010/2011. Der Vergleich mit der Holzenergiestatistik zeigt, dass der Verlauf insgesamt korrekt wieder gegeben wird, wobei der Wert in 2010/2011 geringfügig überschätzt wird. Speziell dargestellt ist der Verlauf beim Verbrauch an Holzschnitzeln (Waldhackschnitzel, Restholz), weil diese Komponente im Modell dynamisch berechnet wird (Abbildung 6).

¹⁶ Referenzpreis Stammholz: 90 CHF/m³.

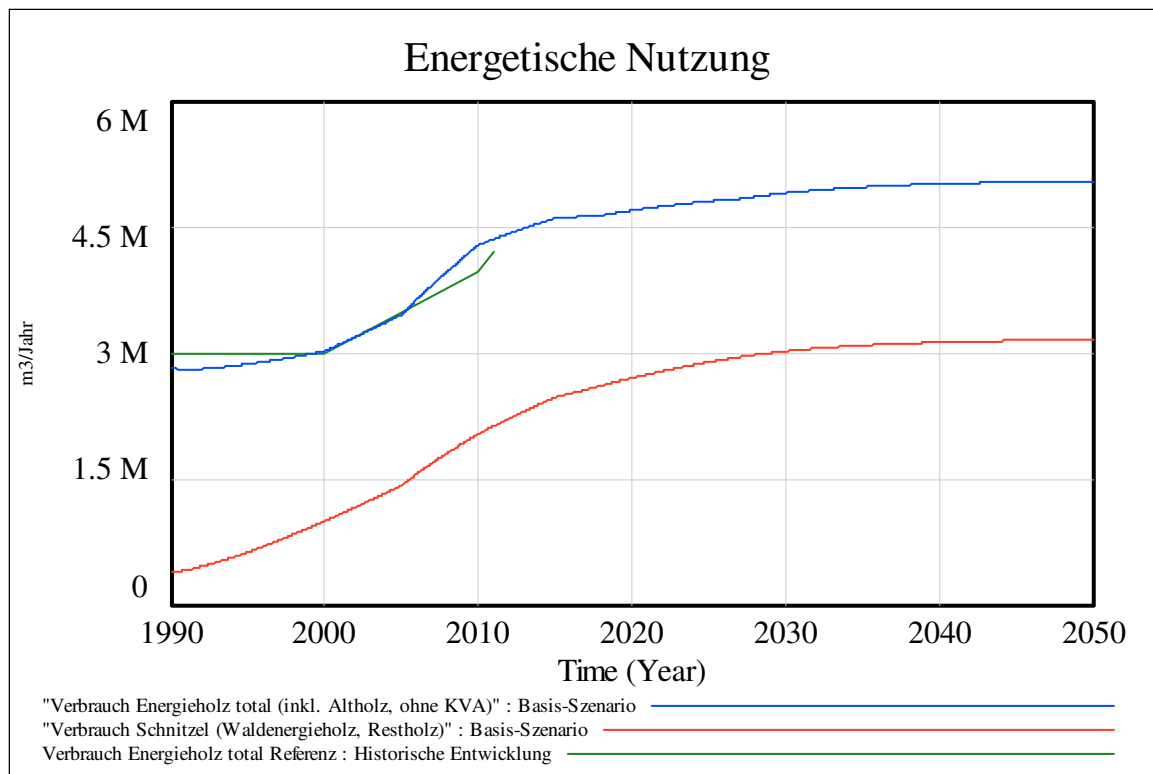


Abbildung 6: Basis-Szenario: Verbrauch Energieholz total (inkl. Altholz, ohne KVA), Verbrauch Schnitzelfeuerungen (Waldenergieholz, Restholz), im Vergleich zum Verbrauch Energieholz gemäss Holzenergiestatistik 2011.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Basis-Szenario ein in sich konsistentes Mengengerüst darstellt und – unter Berücksichtigung der Zielsetzung des Basis-Szenarios – die historische Entwicklung 1990 – 2010 in ausreichender Genauigkeit wiedergibt. Im folgenden Abschnitt wird untersucht, wie sich das Modell unter Annahme extremer Bedingungen und bei einer Variation verschiedener Modellgrössen verhält (Sensitivitätsanalyse).

7. Validierung

7.1. Vorgehen

Die Validierung umfasst zum einen die Sicherstellung, dass die verwendeten Parameter und Variablen richtig gewählt sind und die hinterlegten funktionalen Beziehungen korrekt sind. Dies wurde mit Bezug auf die relevante Literatur und die Validierung im Rahmen von Expertengesprächen erreicht und ist im Modell dokumentiert (Anhang Modelldokumentation). Das Verhalten des Modells als Ganzem wird validiert durch die Analyse verschiedener Extremszenarien sowie durch eine Reihe von Sensitivitätsanalysen in Bezug auf einzelne Parameter und funktionalen Zusammenhänge.

7.2. Extremszenarien

Für die Plausibilisierung des Modellverhaltens werden folgende vier Extremszenarien präsentiert.

Nr.	Bezeichnung	Parameter-Werte
E1	Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz	Vergleichswert für die Wirtschaftlichkeit beim Sägerohholz wird um 50% erhöht in 2010.
E2	Starker Preisanstieg der fossilen Energieträger	Preisanstieg um 100% in 2010.
E3	Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald	Geräumte Flächen Nadelwald werden ab 2010 durch Laubwald ersetzt. Der Anteil Laubwald wird dadurch bis 2050 auf rund 50% erhöht.
E4	Starker Zubau an WKK-Anlagen (Holzheizkraftwerken)	Verdoppelung der Anlagenkapazität, bzw. des Energieholzverbrauchs in WKK-Anlagen gegenüber 2015 bis 2020.

Tabelle 5: Extremszenarien

Die Ergebnisse für die vier Szenarien werden für den Zeithorizont 1990 – 2050 präsentiert. Die Analyse der Simulationsergebnisse zeigt, dass auch für den Zeithorizont von 2050 – 2100 kein Verhalten auftritt, das sich grundlegend von der Phase 1990 – 2050 unterscheidet. Die Ergebnisse werden auf den folgenden Seiten erläutert. Zum Vergleich wird jeweils das Basis-Szenario dargestellt.

Stammholz (Säge-Rohholz)

Szenario E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz) führt zu einem Zuwachs bei der Nutzung von Säge-Rohholz (und entsprechend bei der Kapazität der Sägewerke), Szenario E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) zu einer Abnahme. Die „Energie-Szenarien“ (E2, E4) führen mittelfristig zu einer Abnahme beim Stammholz. Dies ist eine Konsequenz der Tatsache, dass mit steigendem Preis für Energieholz mehr mittleres und schwaches Baumholz als Energieholz genutzt wird. Dieser Effekt ist auch für die leichte Abnahme beim Stammholz im Basis-Szenario verantwortlich (

Abbildung 7).

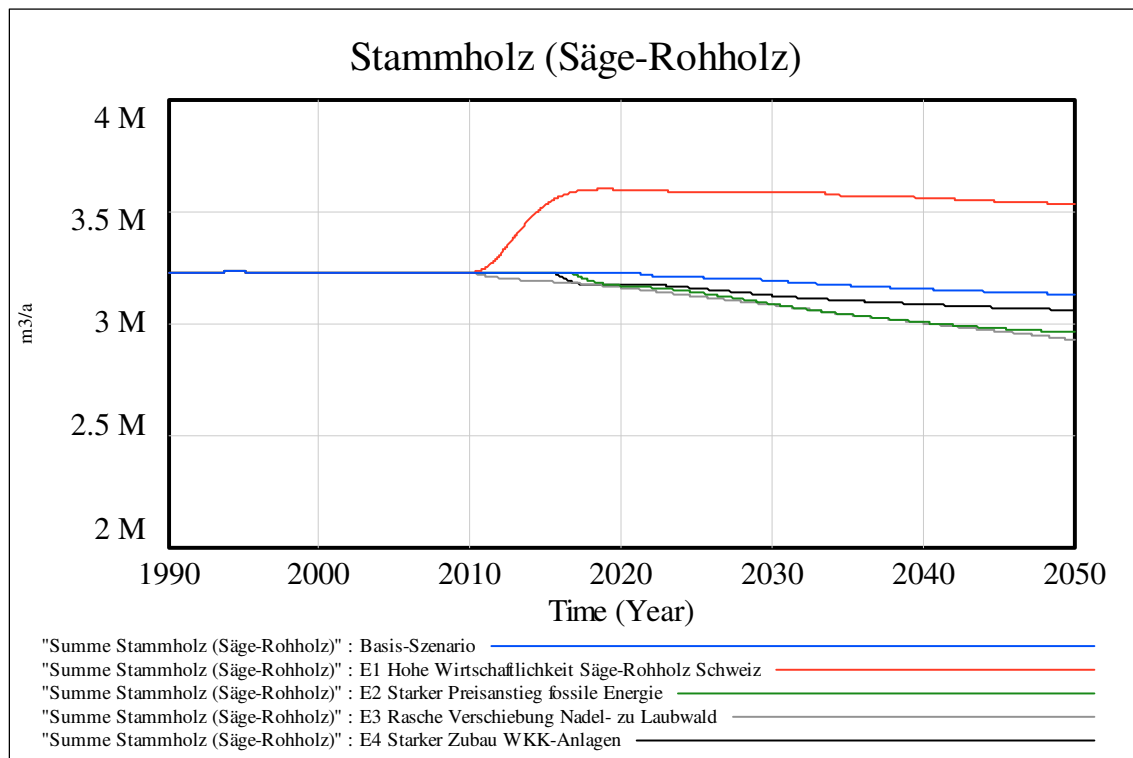


Abbildung 7: Extremszenarien - Entwicklung beim Stammholz (Säge-Rohholz)

Potenzial Energie- und Industrieholz („Schwachholz“)

Das Potenzial Energie- und Industrieholz nimmt in allen Szenarien zu. Bei E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz) ist die Zunahme in einer höheren Stammholzernte und demzufolge einem grösseren Potenzial an Schwachholz begründet, bei E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) im höheren Laubholzanteil, was den Anteil an Schwachholz ebenfalls erhöht. Bei den „Energie-Szenarien“ E2 (Starker Preisanstieg der fossilen Energieträger) und E4 (Starker Zubau an WKK-Anlagen, Holzheizkraftwerken) wird ein geringerer Anteil des geernteten Holzes als Stammholz genutzt bzw. mehr mittleres und schwaches Baumholz wird als Schwachholz genutzt

Abbildung 8).

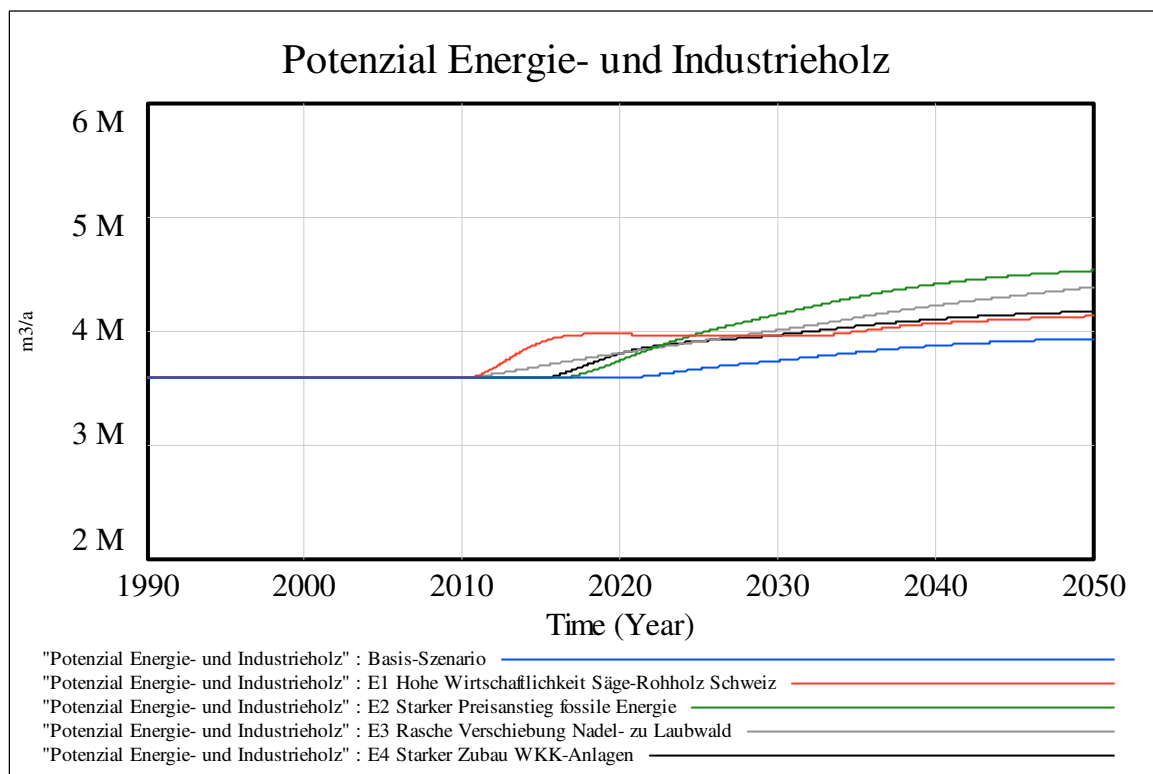


Abbildung 8: Extremszenarien - Potenzial Energie- und Industrieholz ("Schwachholz")

Vorrat total (pro ha)

Der Vorrat nimmt in allen Szenarien zu, allerdings nicht stark. Szenario E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz) weist den tiefsten Wert auf infolge der gestiegenen Holzernte. Die „Energie-Szenarien“ (E2, E4) führen zu einem leicht steigenden Vorrat. Wie bereits erwähnt gilt diese Entwicklung unter der Annahme dass die gestiegenen Preise für Energieholz nicht zu einer veränderten Rationalität bei der Holzernte führen. E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) führt zu keinen nennenswerten Veränderungen in Bezug auf die Vorratsentwicklung gegenüber den anderen Szenarien (Abbildung 9).

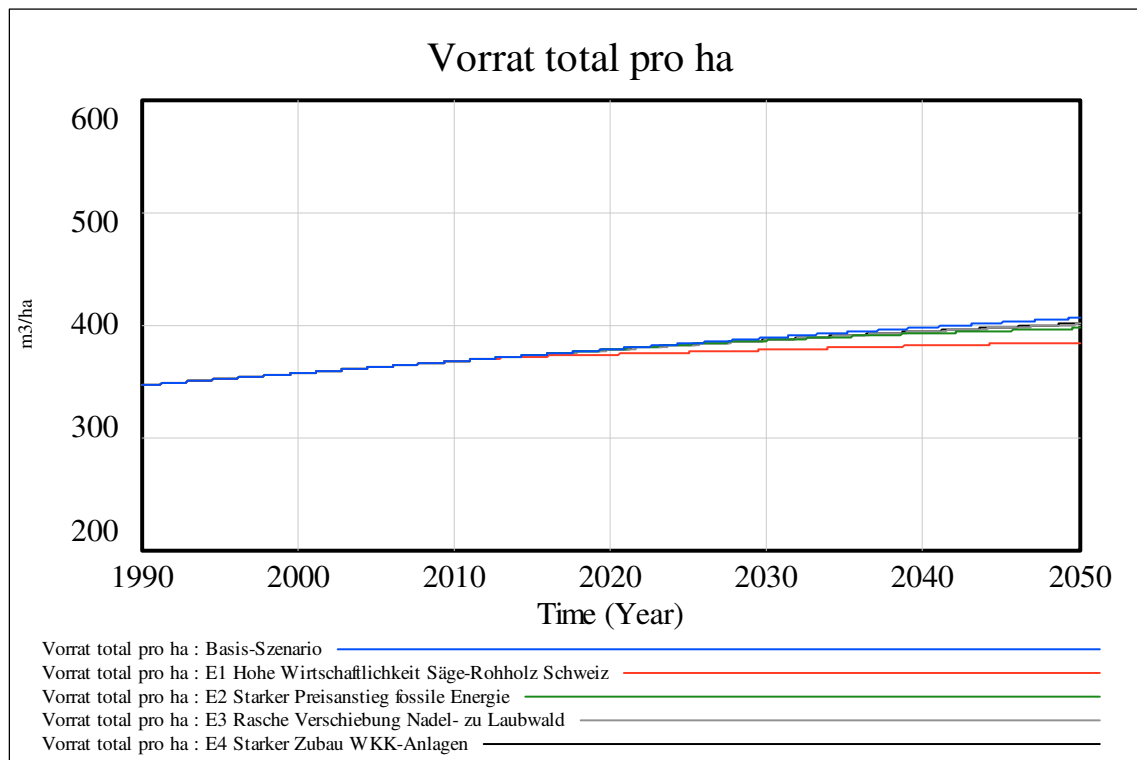


Abbildung 9: Extremszenarien - Vorrat total (pro ha)

Automatische Feuerungsanlagen

Die höchste Anzahl Anlagen resultiert in Szenario E2 (Starker Preisanstieg der fossilen Energieträger aufgrund anhaltend hoher Preise für fossile Energieträger), die tiefste in Szenario E4 (Starker Zubau an WKK-Anlagen, Holzheizkraftwerken). Der Grund dafür liegt darin, dass aufgrund der grossen Nachfrage nach Energieholz durch die Holzheizkraftwerke die Preise für Energieholz steigen, was den Zubau von automatischen Anlagen bremst.¹⁷ Szenario E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) führt aufgrund der Tatsache, dass mehr Schwachholz zur Verfügung steht, ebenfalls zu einer gegenüber dem Basis-Szenario höheren Anzahl Anlagen (

Abbildung 10).

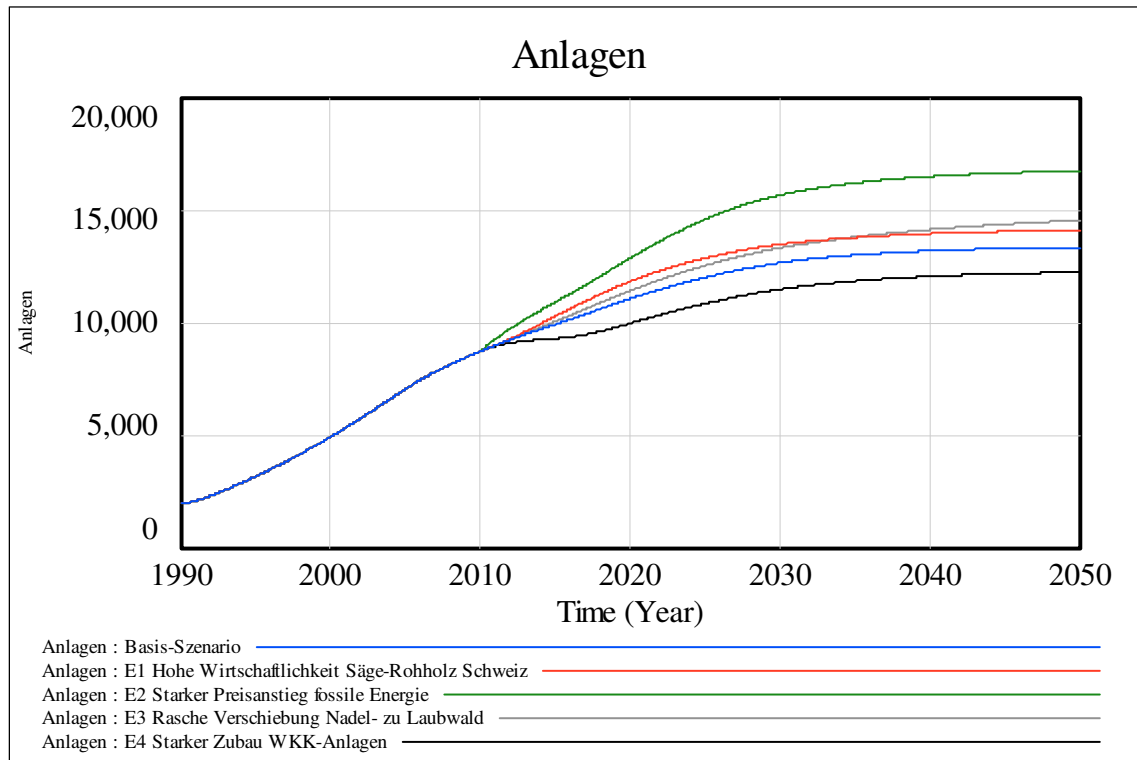


Abbildung 10: Extremszenarien - Automatische Feuerungsanlagen

Preis Energieholz (Waldhackschnitzel)

Der Preis für Energieholz steigt im Szenario E2 (Starker Preisanstieg der fossilen Energieträger) am stärksten an, weil hier die Nachfrage nach Energieholz aufgrund hoher Preise bei den fossilen Energieträgern steigt und die Holzenergie trotz steigender Preise beim Energieholz wirtschaftlich bleibt. Dies gilt auch für E4 (Starker Zubau an WKK-Anlagen, Holzheizkraftwerken), obwohl hier die Preise weniger stark steigen. Der Grund dafür liegt darin, dass sich die Anzahl der automatischen Anlagen entsprechend anpasst. Die grosse Verfügbarkeit von Laubholz in E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) hat ein tieferes Preisniveau beim Energieholz zur Folge, was entsprechend zu einem relativ hohen Zubau von automatischen Anlagen führt (

Abbildung 11). In allen Szenarien ist eine Abflachung des Preisanstiegs zu beobachten.

¹⁷ Dies würde sich ändern, wenn gleichzeitig auch der Preisanstieg für fossile Energie berücksichtigt würde.

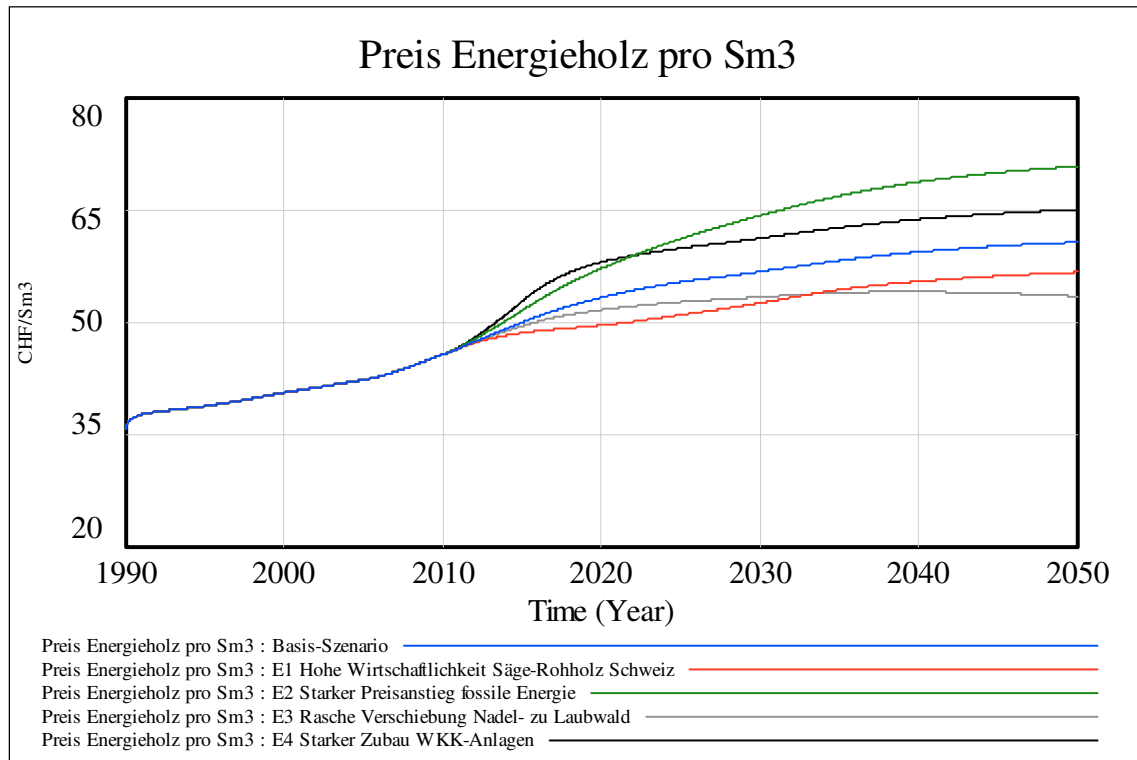


Abbildung 11: Extremszenarien - Preis Energieholz (Waldhackschnitzel)

Industrieholz

Beim Industrieholz sieht die Situation relativ heterogen aus. Die steigenden Preise für Energieholz (E2, E4) führen zu einer Abnahme der Verfügbarkeit von Industrieholz, wie dies mittelfristig auch im Basis-Szenario zu beobachten ist. Die beiden Szenarien E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz) und E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) lassen ein ungefähr konstantes Aufkommen beim Industrieholz erwarten. In E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz) ist dies auf die insgesamt grössere Holzernte zurückzuführen, bei der auch mehr Schwachholz anfällt. In E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald) ist es im grossen Anteil an Laubholz begründet (Abbildung 12).

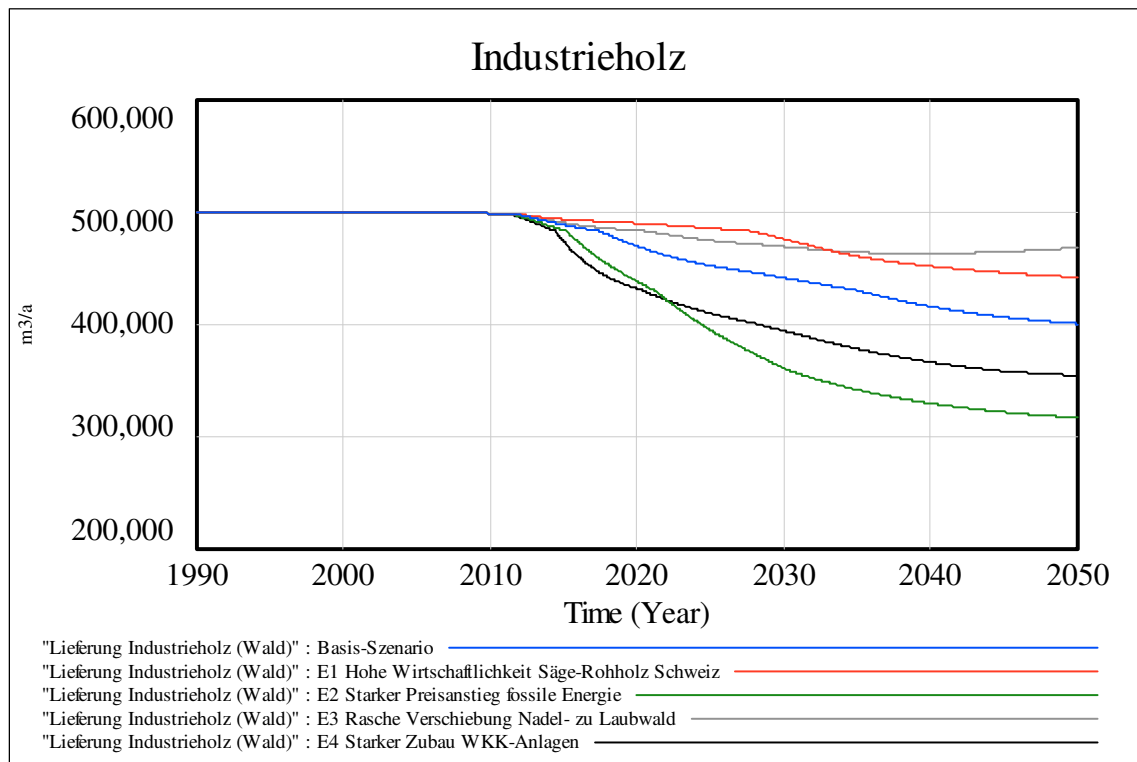


Abbildung 12: Extremszenarien – Industrieholz

7.3. Ergebnisse der Validierung anhand der Extremszenarien

Die Diskussion der Extremszenarien zeigt im Wesentlichen die Plausibilität des Modells. Die gegenseitigen Abhängigkeiten im Modell führen zu einem Modellverhalten, das grundsätzlich plausibel ist.

Die Untersuchung der Extremszenarien zeigt allerdings auch die Grenzen des Modells auf, welche in Übereinstimmung sind mit den in Kapitel 5 diskutierten Annahmen und den teilweise daraus folgenden Einschränkungen für die Gültigkeit des Modells.

Kritisch zu beurteilen sind insbesondere folgende Punkte:

- Nutzholz als Leitsortiment (und massgeblicher Einflussfaktor neben der Förderung) für die Holzernte:* Dies hat unter anderem auch zur Folge, dass die Holzernte ausschliesslich für eine sehr grosse Wirtschaftlichkeit beim Stammholz maximale Werte annehmen kann. Konkret bedeutet dies, dass die maximale Holzernte (inkl. Ernteverluste) in keinem dieser Szenarien über rund 8.5 Mio. m³/a ansteigt (gegenüber einem Wert von rund 7.5 Mio. m³/a in 2010). Dies würde sich erst grundlegend ändern, wenn die Holzernte massgeblich durch die Energieholzpreise bestimmt würde bzw. die Holzwirtschaft stark gefördert würde. Zwar hat der Energieholzpreis bereits in der aktuellen Modellversion einen Einfluss auf die genutzte Holzmenge, stellt aber insgesamt nicht die zentrale Einflussgrösse dar. In der aktuellen Modellversion beeinflusst der Energieholzpreis den Anteil des mittleren und schwachen Baumholzes, das als Stammholz bzw. als Industrie- oder Energieholz genutzt wird. Weiter hat der Preis von Energieholz einen Einfluss auf die tatsächlich dem Wald entzogene Menge beim Schwachholz, bzw. umgekehrt auf den Anteil an Schwachholz, der im Wald liegen gelassen wird. In diesem Sinn wird im Modell der Bedeutung des

Energieholzpreises in gewissem Umfang Rechnung getragen, ohne die grundlegende Rationalität der Holznutzung (Nutzholz als Leitsortiment für die Holznutzung) zu verändern.

- *Lieferung Industrieholz in Funktion des verfügbaren Potenzials für Energie- und Industrieholzes und des Energieholzpreises im Vergleich zum Preis für Industrieholz:* Diese Funktion berücksichtigt, dass gemäss Aussage der Unternehmen bei den heutigen Verhältnissen zwischen den Preisen für Energie- bzw. Industrieholz die gewünschte Nachfrage nach Industrieholz weitgehend durch Schweizer Holz befriedigt wird. Dies ist unter anderem eine Folge der Tatsache, dass lokal mehr Energie- bzw. Industrieholz zur Verfügung stehen kann als für eine energetische Verwertung genutzt werden kann. Steigende Energiepreise könnten in Zukunft dazu führen, dass Energieholz auch über grössere Strecken transportiert wird, wodurch der Anteil des gelieferten Industrieholzes abnimmt. Die im Modell unterlegte Funktion bildet diesen Sachverhalt qualitativ richtig ab, und wird im Folgenden in einer Sensitivitätsanalyse überprüft.
- *Restholz exogen:* Das für energetische Zwecke genutzte Restholz wird exogen vorgegeben, wobei angenommen wird, dass diese Menge ab 2010 auf dem aktuellen Wert verbleibt. Die Annahme wird dadurch begründet, dass das für energetische Zwecke nutzbare Restholz im Wesentlichen ausgeschöpft ist (vgl. Tabelle 2).
- *WKK exogen:* Die Annahme, dass der Zubau von WKK-Anlagen, bzw. Holzheizkraftwerken singuläre Entscheidungen sind, die sich nicht modellmässig erfassen lassen, ist in Anbetracht der geforderten Detaillierung für einzelne Bereiche sicher richtig. Sie führt aber dazu, dass nach Ablauf der Lebensdauer dieser Anlagen keine Neubeurteilung aufgrund der Wirtschaftlichkeit erfolgen würde, und die Anlagen unabhängig davon weiter betrieben würden. Dies schränkt die Gültigkeit des Modells in dieser Hinsicht auf einen Zeitraum von rund 20 Jahren ab 2015 ein (2035). Aussagen über einen längeren Zeithorizont können nur unter Berücksichtigung veränderter exogener Umfelder (v.a. der Preise für fossile Energie) gemacht werden.

7.4. Sensitivitätsanalyse

Neben der Untersuchung von Extremszenarien wurden für die Validierung des Modells auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse von ausgewählten Sensitivitätsanalysen präsentiert, und zwar in einem ersten Abschnitt in Bezug auf Parameter und Konstanten und in einem zweiten Abschnitt in Bezug auf funktionale Zusammenhänge. Bei der Sensitivitätsanalyse der Parameter wird untersucht, wie sich das Modell verhält, wenn diese Parameter in einem bestimmten Bereich variiert werden, in welchem sich auch der im Modell verwendete Wert befindet. Im Falle der funktionalen Zusammenhänge wird jeweils die „Stärke“ dieses Einflusses variiert und zwar von „schwach“ über „mittel“ zu „stark“, wobei die „mittlere“ Stärke der im Modell verwendeten Funktion entspricht. Die Szenarien sind entsprechend bezeichnet. Die Sensitivitätsanalysen wurden für den Zeitraum von 2000 – 2050 erstellt.¹⁸

Parameter und Konstanten:

- Nutzungsrate Durchforstung Referenz → Einfluss auf die Ernte von mittlerem und schwachen Baumholz aus der Durchforstung (Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse Nutzungsrate Durchforstung)
- Diffusionskonstante beim Zubau von automatischen Anlagen → Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit welcher neue automatische Anlagen erstellt werden (Tabelle 7).

Funktionale Zusammenhänge (Tabelle 8):

- Aufteilung Energie- und Industrieholz in Abhängigkeit vom Preis Energieholz im Vergleich zum Industrieholz
- Einfluss Energieholzpreis auf Nutzung des mittleren Baumholzes
- Einfluss Stammholzpreis auf Durchforstungsrate
- Einfluss Wirtschaftlichkeit Rohholz auf Kapazität Sägereien.

¹⁸ Die hier dargestellten Abbildungen sind in Anhang 14.2 vergrößert nochmals abgebildet.

Ausgewählte Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

a) Variation von Parameter und Konstanten

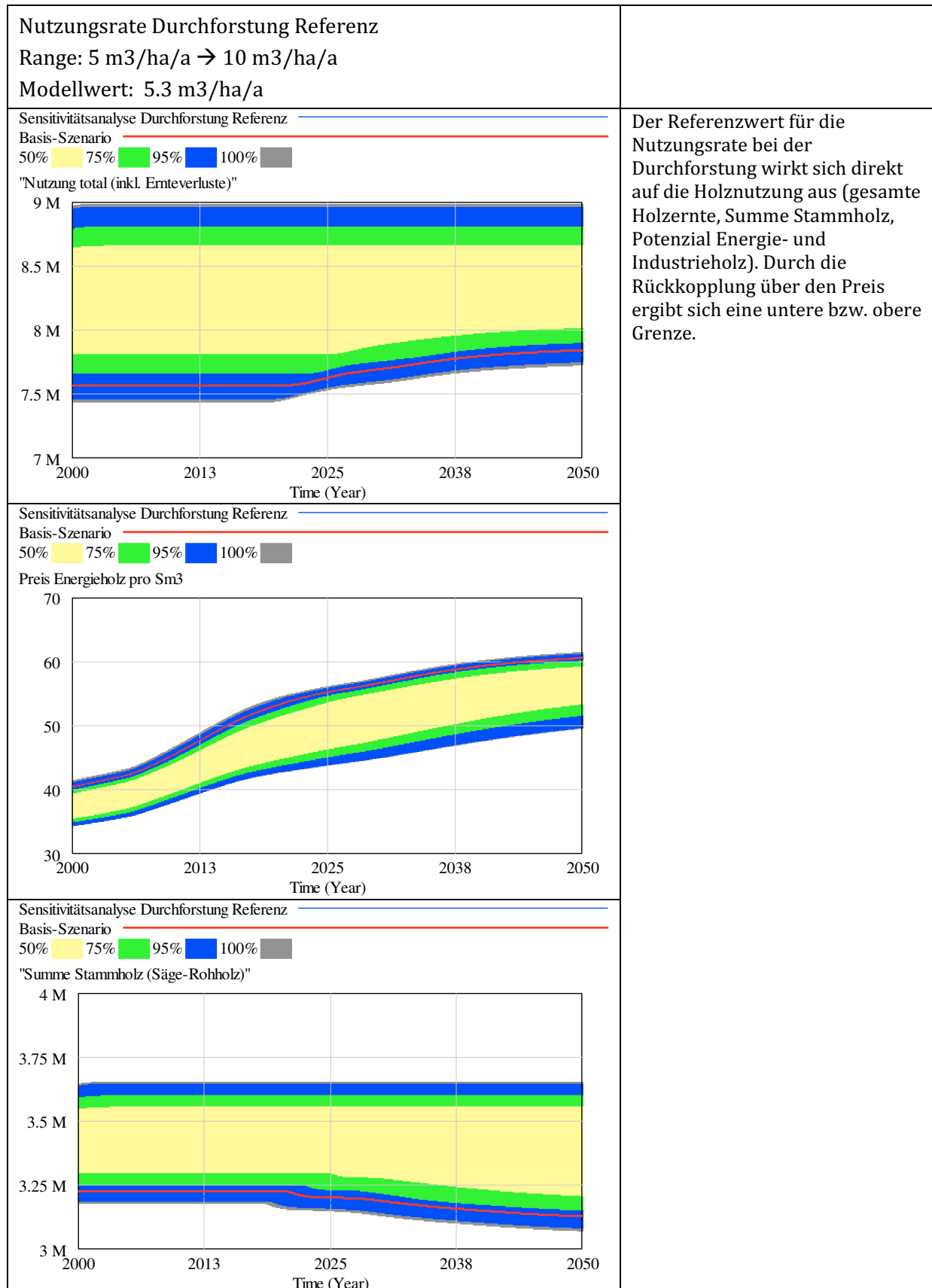


Tabelle 6: Sensitivitätsanalyse Nutzungsrate Durchforstung

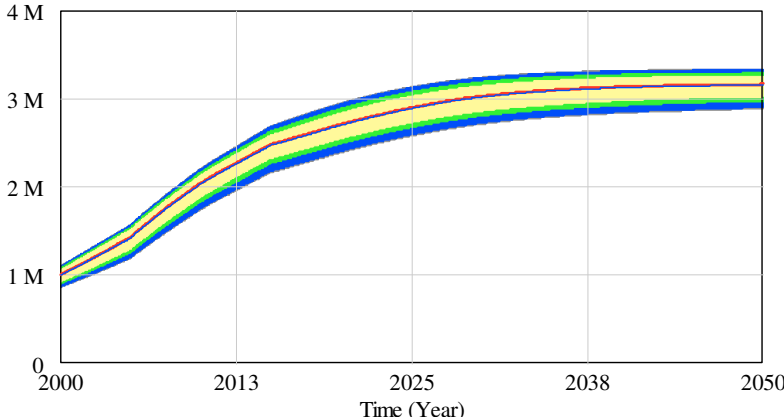
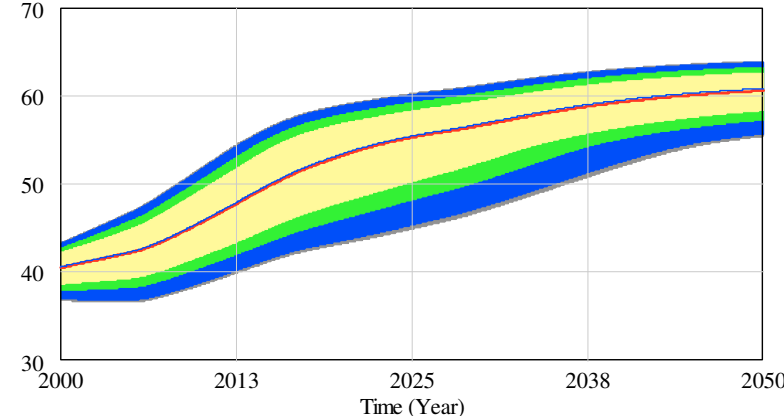
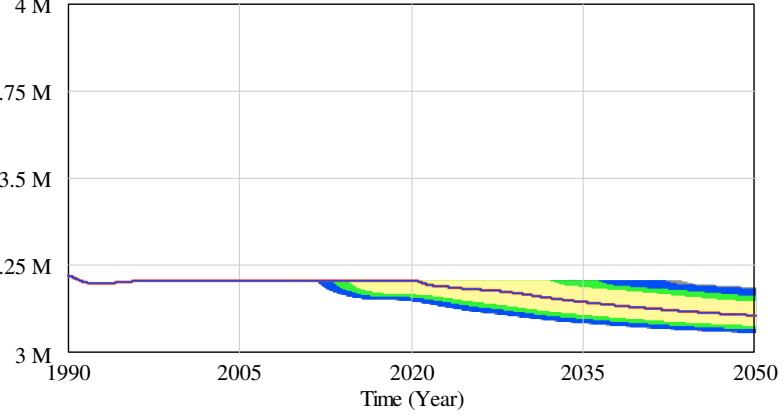
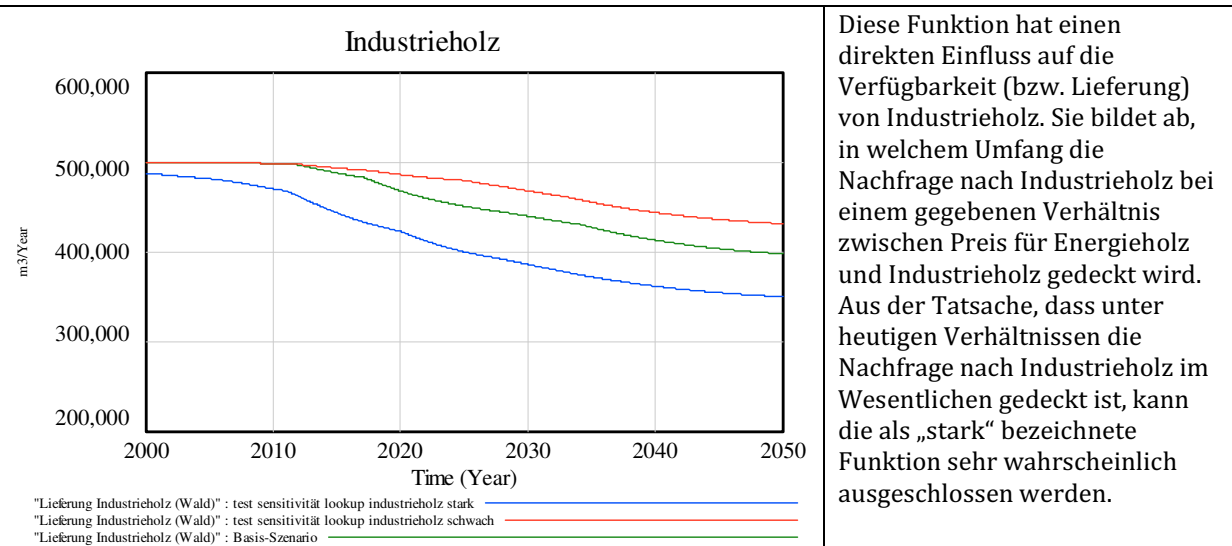
Diffusionskonstante Zubau automatische Feuerungsanlagen Range: 0.15 → 0.25 Modellwert: 0.2	
Sensitivitätsanalyse Diffusionskonstante Basis-Szenario 50% 75% 95% 100% "Verbrauch Schnitzel (Waldenergieholz, Restholz)" 	Je nach Wert der Diffusionskonstante stellt sich ein langsamerer oder ein schnellerer Zubau bei den Anlagen und damit beim Brennstoffverbrauch ein.
Sensitivitätsanalyse Diffusionskonstante Basis-Szenario 50% 75% 95% 100% Preis Energieholz pro Sm³ 	Die Veränderung beim Zubau der Anlagen und dementsprechend bei der Nachfrage nach Energieholz hat eine unterschiedliche Entwicklung bei den Energieholzpreisen zur Folge. Die tiefen Preise resultieren bei einem langsamen Zubau. In diesem Sinn kann sowohl die Preisentwicklung als auch die Entwicklung beim Brennstoffverbrauch dazu verwendet werden, einen plausiblen Wert für die Diffusionskonstante zu bestimmen.
Sensitivitätsanalyse Diffusionskonstante Basis-Szenario 50% 75% 95% 100% "Summe Stammholz (Säge-Rohholz)" 	Im Gegensatz zu den oben dargestellten Variablen hat die Variation der Diffusionskonstante eine geringe Auswirkung auf das genutzte Stammholz. Das ist auch sinnvoll so, weil nur ein indirekter Zusammenhang zwischen dem Zubau von Anlagen und dem Angebot an Stammholz besteht.

Tabelle 7: Sensitivitätsanalyse Diffusionskonstante Zubau automatische Feuerungsanlagen

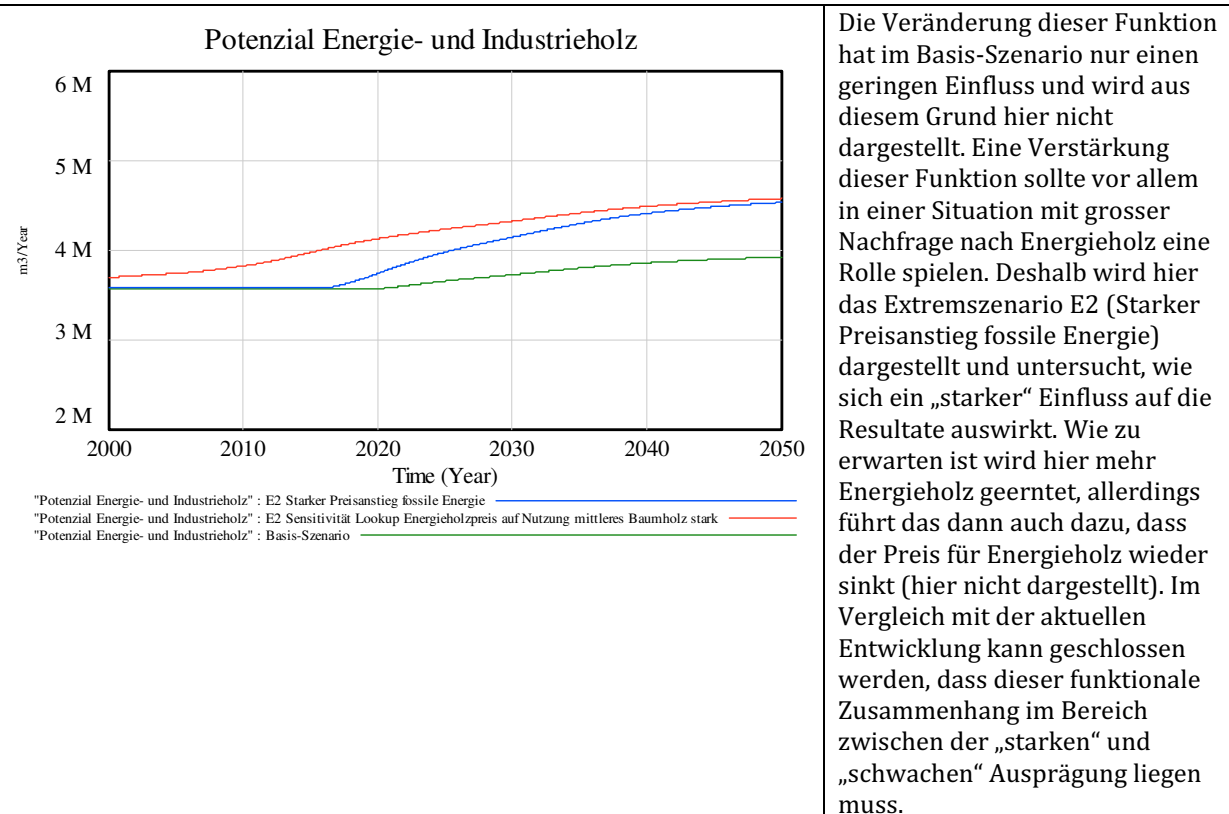
b) Sensitivitätsanalyse funktionaler Zusammenhänge

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen funktionaler Zusammenhänge präsentiert. Dabei wird eine Auswahl von Aspekten diskutiert, welche zusätzliche Einsichten in die Validität des Modells erlauben (Tabelle 8).

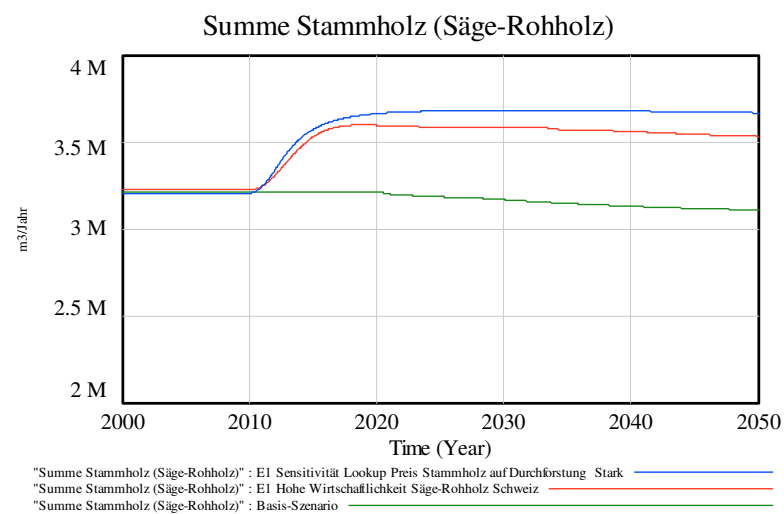
Aufteilung Energie- und Industrieholz in Abhängigkeit vom Preis Energieholz im Vergleich zum Industrieholz



Einfluss Energieholzpreis auf Nutzung des mittleren Baumholzes

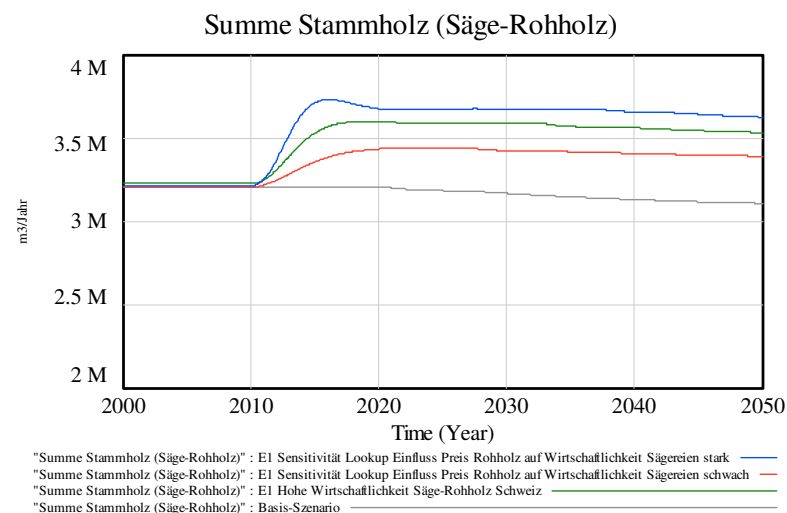


Einfluss Stammholzpreis auf Durchforstungsrate



Die Veränderung dieser Funktion hat im Basis-Szenario nur einen geringen Einfluss und wird aus diesem Grund hier nicht dargestellt. Eine Verstärkung dieser Funktion sollte vor allem in einer Situation mit grosser Nachfrage nach Stammholz eine Rolle spielen. Deshalb wird hier das Extremszenario E1 (Hohe Wirtschaftlichkeit Säge-Rohholz Schweiz) dargestellt und untersucht, wie sich ein „starker“ Einfluss auf die Resultate auswirkt. Wie zu erwarten wird mehr Stammholz geerntet, allerdings führt das dann auch dazu, dass der Preis für Stammholz wieder sinkt (hier nicht dargestellt).

Einfluss Wirtschaftlichkeit Rohholz auf Kapazität Sägereien



Diese Funktion berücksichtigt wie sich eine Veränderung bei der Wirtschaftlichkeit der Sägereien im Rahmen der internationalen Wettbewerbssituation auf die Kapazität, bzw. den erwünschten Rohholzeinschnitt auswirkt. Je nach Ausprägung reagiert die Kapazität bzw. der erwünschte Einschnitt stärker oder schwächer auf den Preis und im Falle der stärkeren Ausprägung kann ein Überschwingen eintreten. Je nach Ausprägung stellt sich ein Gleichgewicht auf einem höheren oder tieferen Niveau ein. In diesem Sinn müsste diese Funktion in einer Weiterentwicklung des Modells genauer untersucht werden, um empirisch den Zusammenhang zwischen Preisänderungen beim Rohholz und Kapazität bzw. Einschnitt zu ermitteln.

Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse funktionaler Zusammenhänge

7.5. Schlussfolgerungen zur Validierung

Die Variation der Parameter zeigt, dass diese Variation die erwarteten Auswirkungen hat. Die Auswirkungen sind geringer auf solche Variablen, die nicht direkt von der Veränderung dieser Parameter abhängen, was ein Zeichen der Robustheit des Modells ist. Die im Modell festgelegten Parameterwerte sind so gewählt, dass das Basis-Szenario mit dem aktuellen Mengengerüst, bzw. den Werten 1990 – 2010 übereinstimmt.

Die Ergebnisse der Validierung der funktionalen Zusammenhänge zeigen, dass die verwendeten „mittleren“ Funktionen grundsätzlich plausibel sind. Sie weisen aber auch auf einen weiteren Entwicklungsbedarf im Modell hin. Bei zwei der untersuchten Funktionen ist für eine Weiterentwicklung des Modells ein Bedarf nach einer weiteren empirischen Abstützung festzustellen. Dies betrifft die Funktion, welche sich auf die Aufteilung zwischen Energie- und Industrieholz bezieht und diejenige, welche sich auf den Einfluss der Wirtschaftlichkeit Rohholz auf die Kapazität Sägereien bezieht. Bei diesen beiden Funktionen ist es so, dass sie vereinfachend einen komplexeren Sachverhalt beschreiben, der für das Modell wichtig ist, der aber in Anbetracht des gesamten Modellzwecks hier nicht weiter detailliert wurde. In diesem Sinn könnte eine weitere empirische Abstützung zu einer Verbesserung des Modells beitragen, ohne den Detaillierungsgrad im Modell zu erhöhen. Die beiden anderen Funktionen beziehen sich letztlich auf die Frage nach der Rationalität der Holzernte in Bezug auf die Preise von Stammholz und Energieholz. Eine Modifikation dieser Funktionen ist daher erst sinnvoll, wenn diese Rationalität vertieft und allenfalls unter geänderten Rahmenbedingungen neu beschrieben bzw. modelliert wird.

8. Resultate

8.1. Einleitung: Handlungsoptionen und Umfeld

In diesem Abschnitt werden die Modellergebnisse präsentiert und die Auswirkungen verschiedener Handlungsoptionen untersucht. Dabei wird unterschieden zwischen „Handlungsoptionen“ und „Umfeldern“. Unter „Handlungsoptionen“ werden diejenigen Massnahmen oder Instrumente verstanden, die durch die Behörden (Kanton oder Bund) beeinflusst werden können. „Umfelder“ bezeichnen dagegen Entwicklungen, welche als nicht beeinflussbar erachtet werden und einen grossen Einfluss auf die Modellergebnisse erwarten lassen. In Tabelle 9 und Tabelle 10 werden die Handlungsoptionen bzw. die Umfeld

Handlungsoptionen	Umsetzung im Modell, Parametrisierung	Bezeichnung
<i>Forstwirtschaft</i>		
Förderung Holzernte (nur auf Flächen mit hohen Erntekosten)	Förderung: 20 CHF/ha auf Flächen mit hohen Erntekosten. Die Förderung wird beschränkt auf Nadelwald. ¹⁹	H1 Förderung Holzernte
Verschiebung der Anteile bei den Hauptbaumarten von Nadel- zu Laubholz	50% der geräumten Flächen mit Nadelwald werden ab 2010 jeweils durch Laubwald ersetzt.	H2 Verschiebung Nadel- zu Laubwald → vgl. auch E3 (Rasche Verschiebung des Anteils Nadel- zu Laubwald)
<i>Energie</i>		
Rahmenbedingungen für die Förderung erneuerbarer Energie (Holzenergie)	Keine spezielle Förderung der Holzenergie (ausser durch KEV für Strom aus Holz; im Modell nicht explizit modelliert)	Im Basis-Szenario enthalten
Gestaltung der KEV für Strom aus Holz	Zubau von WKK-Anlagen und von Holzheizkraftwerken exogen vorgegeben.	Im Basis-Szenario enthalten → vgl. auch E4 (Starker Zubau an WKK-Anlagen, Holzheizkraftwerken)

Tabelle 9: Handlungsoptionen und ihre Umsetzung im Modell

¹⁹ Die Förderung von 20 CHF/ha/a entspricht in der Grössenordnung der Förderung im Kanton Luzern (Seilkranbeiträge von rund 200'000 CHF umgerechnet auf die Waldfläche mit hohen Erntekosten (25% von total 40'000 ha Wald)). Es wird angenommen, dass die Förderung über 5 Jahre (2010-2015) kontinuierlich bis auf den Zielwert erhöht wird.

Umfelder	Umsetzung im Modell, Parametrisierung	Bezeichnung
<i>Forst- und Holzwirtschaft</i>		
Wirtschaftlichkeit Holzindustrie im Vergleich mit dem europäischen Ausland (Währungskurs Euro)	Rückgang Wirtschaftlichkeit bzw. der Konkurrenzfähigkeit um 20% in 2008; danach konstant.	U1 Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008
<i>Energie</i>		
Entwicklung bei den Wärmegestehungskosten für fossil erzeugte Wärme	Anstieg der Preise für fossile Energie um 50% bis 2030 verglichen mit 2010.	U2 Anstieg Preise für fossile Energie → vgl. auch E2 (Starker Preisanstieg der fossilen Energieträger)

Tabelle 10: Umfelder und ihre Umsetzung im Modell

Im Folgenden werden zunächst die beiden Handlungsoptionen H1 und H2 im Vergleich zum Basis-Szenario diskutiert. Anschliessend wird untersucht, welche Auswirkungen zu erwarten sind, wenn diese Handlungsoptionen in veränderten Umfeldern (U1, U2) realisiert werden. Diese Diskussion wird beschränkt auf diejenigen Kombinationen, welche die grössten Auswirkungen erwarten lassen. Zum Abschluss wird zusammenfassend ausgeführt, welche Auswirkungen auf die stoffliche Nutzung insgesamt zu erwarten sind.

Im Vergleich zu den oben präsentierten Extremszenarien ist einzig H1 (Förderung Holzernte) grundsätzlich neu. Bei den übrigen sind es im Wesentlichen gleiche Szenarien, aber mit weniger starken Annahmen. Die Resultate werden für den Zeitraum von 2000 – 2050 präsentiert.

8.2. Handlungsoption H1 (Förderung Holzernte)

Handlungsoption H1 (Förderung Holzernte) zielt auf eine vermehrte Holznutzung, weshalb hier die Ergebnisse für Stammholz und die Auswirkungen auf den Preis Stammholz diskutiert werden.

Die Förderung hat eine leicht höhere Ernte und Nutzung von Stammholz zur Folge (Abbildung 13). Diese fällt allerdings weniger stark aus als erwartet, weil der Preis für Stammholz infolge des höheren Angebots sinkt und die leicht höhere Nachfrage (Einschnitt Sägereien Schweiz) den Preis erst nach und nach wieder ansteigen lässt (Abbildung 14). Der sinkende Preis beim Stammholz hat auch zur Folge, dass die Durchforstung zurückgeht, und zwar sowohl beim Nadel- als auch beim Laubwald. Dadurch wird in dem hier untersuchten Fall eine Zunahme beim Nadelholz aufgrund der Förderung teilweise wieder zunichte gemacht durch eine Abnahme beim Laubholz. Insgesamt ist daher auch kaum eine Zunahme beim Energie- und Industrieholz zu beobachten.

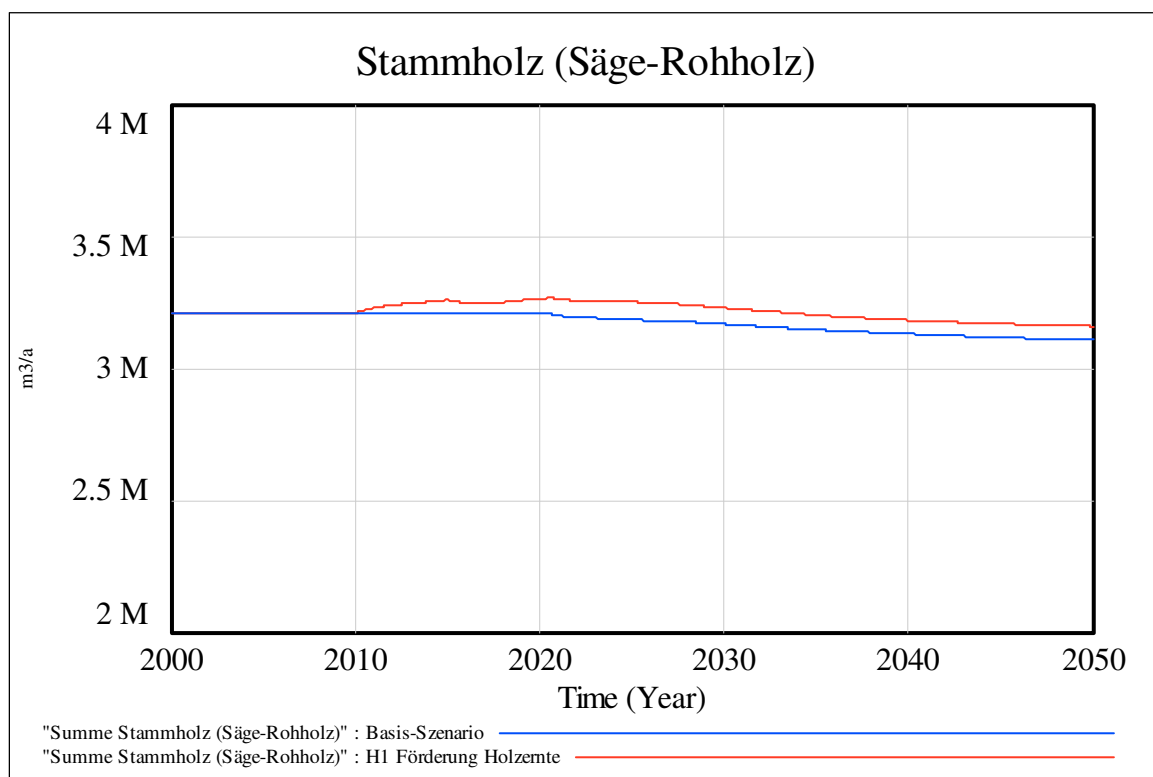


Abbildung 13: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf die Ernte von Stammholz

Aus diesen Gründen sollte eine Förderung auf der Angebotsseite mit Massnahmen auf der Nachfrageseite verbunden werden, um die aufgezeigten negativen Effekte auf den Holzpreis zu vermeiden. Eine Förderung auf der Nachfrageseite lässt eine Zunahme bei der Holznutzung erwarten bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Holzpreise, solange die internationale Konkurrenzfähigkeit aufrecht erhalten (oder im Idealfall sogar gefördert) werden kann.

Mit den hier unterstellten Annahmen würden Kosten von rund 4 Mio. CHF/a resultieren und eine zusätzliche Nutzung von rund 70'000 m³/a Stammholz bewirken (bezogen auf das Jahr

2025). Damit liegen diese Kosten im Bereich der Beiträge, die gemäss Testbetriebsnetz TBN 2008 im Alpenraum auf der zweiten Produktionsstufe ausgerichtet werden (BAFU 2012a).²⁰

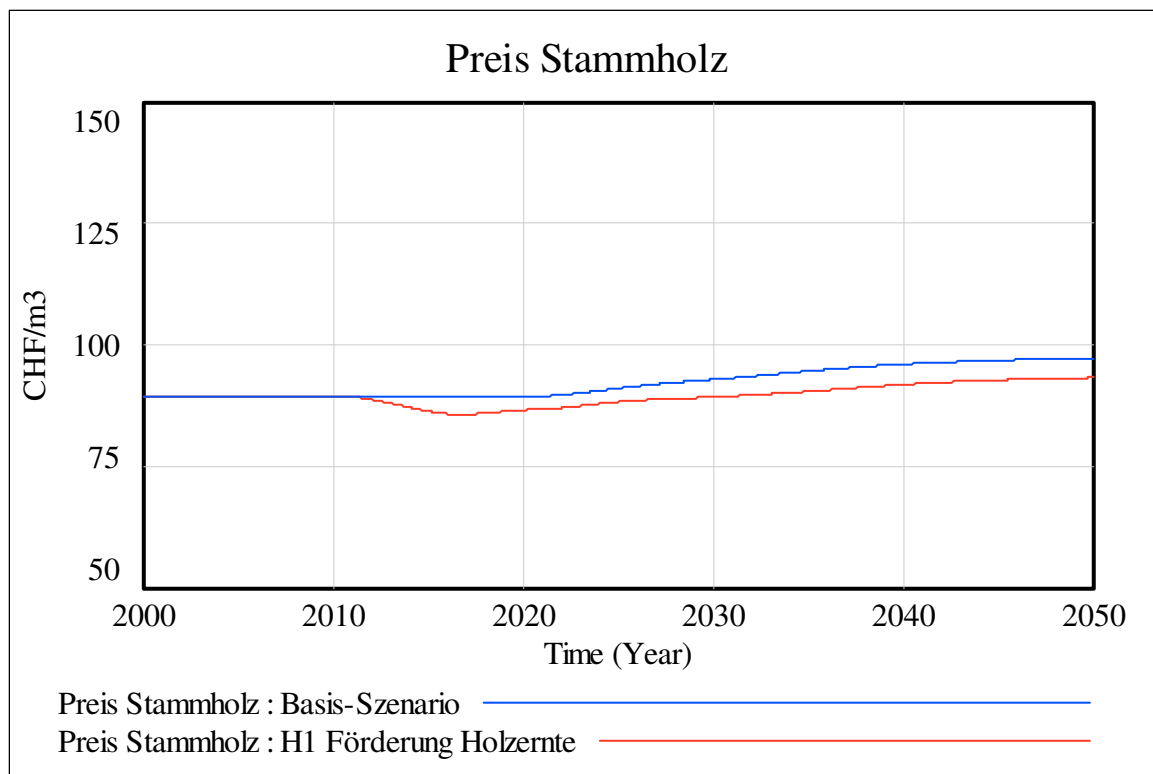


Abbildung 14: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf den Preis von Stammholz.

8.3. Handlungsoption H2 (Verschiebung Nadel- zu Laubwald)

Handlungsoption H2 (Verschiebung Nadel- zu Laubwald) hat Auswirkungen in mehrfacher Hinsicht. Je nach Zielgrösse werden die Auswirkungen unterschiedlich bewertet. Durch die Annahme, dass ab 2010 jeweils 50% der freiwerdenden Nadelwaldflächen mit Laubwald aufgeforstet werden, nimmt der Anteil Nadelwald von 65% in 2000 auf rund 52% in 2050 ab. In den folgenden Abbildungen werden zum Vergleich jeweils die Resultate für Handlungsoption H1 (Förderung Holzernte) und Handlungsoption H2 (Verschiebung Nadel- zu Laubwald) dargestellt. Die gesamte genutzte Holzmenge (inkl. Ernteverluste) liegt bei beiden Handlungsoptionen unter den hier getroffenen Annahmen in der gleichen Grössenordnung.

Die Verschiebung in Richtung Laubholz hat zur Folge, dass die Stammholzernte leicht zurückgeht (Abbildung 15) und der Preis für Stammholz dementsprechend leicht ansteigt (Abbildung 16).

²⁰ Eine Sensitivitätsanalyse der funktionalen Beziehung zwischen Förderhöhe und Zunahme der genutzten Fläche bzw. der Holzernte zeigt, dass die grundsätzlichen Aussagen dieselben bleiben. Die genutzte Menge würde sich unter Annahme einer stärkeren Ausprägung der Funktion zwar stärker erhöhen, der abschwächende Effekt über den Preis würde aber ebenfalls stärker ausfallen.

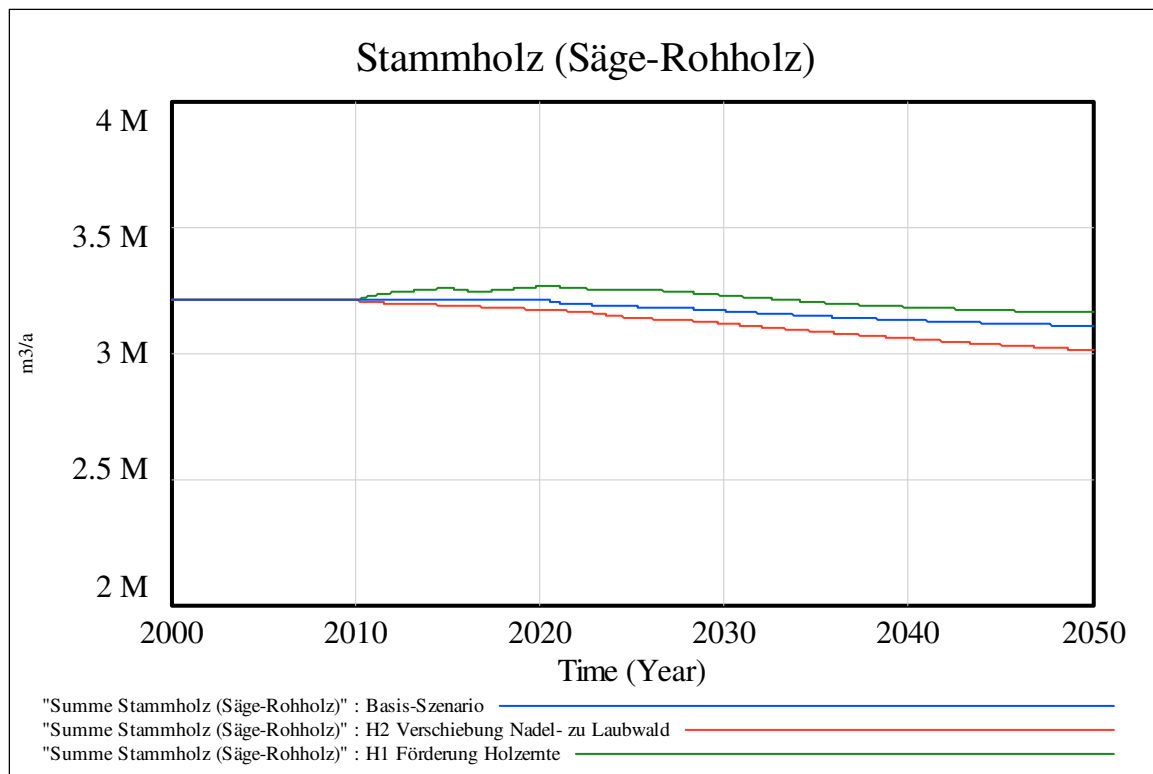


Abbildung 15: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Ernte von Stammholz

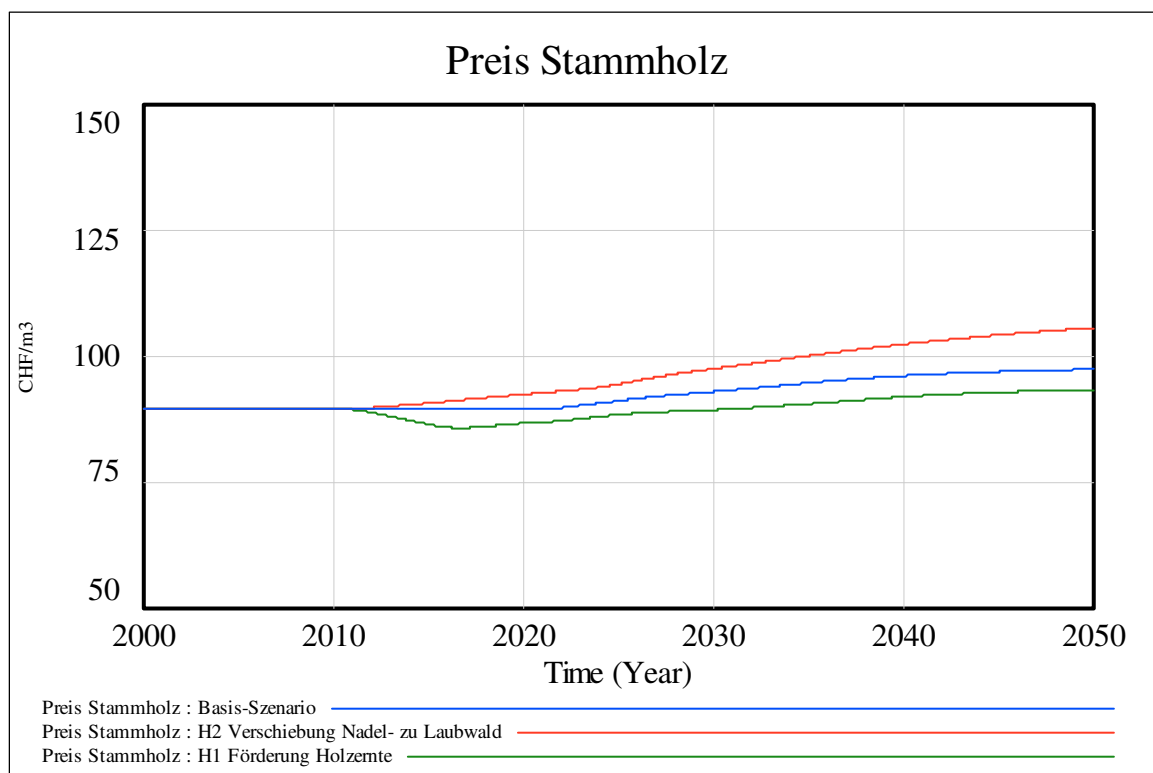


Abbildung 16: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf den Preis von Stammholz.

Die Zunahme beim Laubholz hat zur Folge, dass das Angebot an Energie- und Industrieholz („Schwachholz“) zunimmt. Es steht daher sowohl mehr Industrieholz als auch mehr Energieholz zur Verfügung (Abbildung 17: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf

die Verfügbarkeit von Industrieholz.). Dies hat zur Folge, dass der Preis Energieholz weniger stark steigt als im Basis-Szenario und daher eine grössere Anzahl automatischer Anlagen zu erwarten ist. In Bezug auf das Industrieholz ist die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (Handlungsoption H2) positiv zu bewerten, weil mehr Holz zur Verfügung steht und der Preis für Energieholz tendenziell langsamer ansteigt.

Zusammenfassend lässt sich für diese Handlungsoption festhalten, dass sie unter den hier getroffenen Annahmen zu keinen fundamentalen Veränderungen führt, weder beim Stammholz, noch beim Schwachholz.²¹

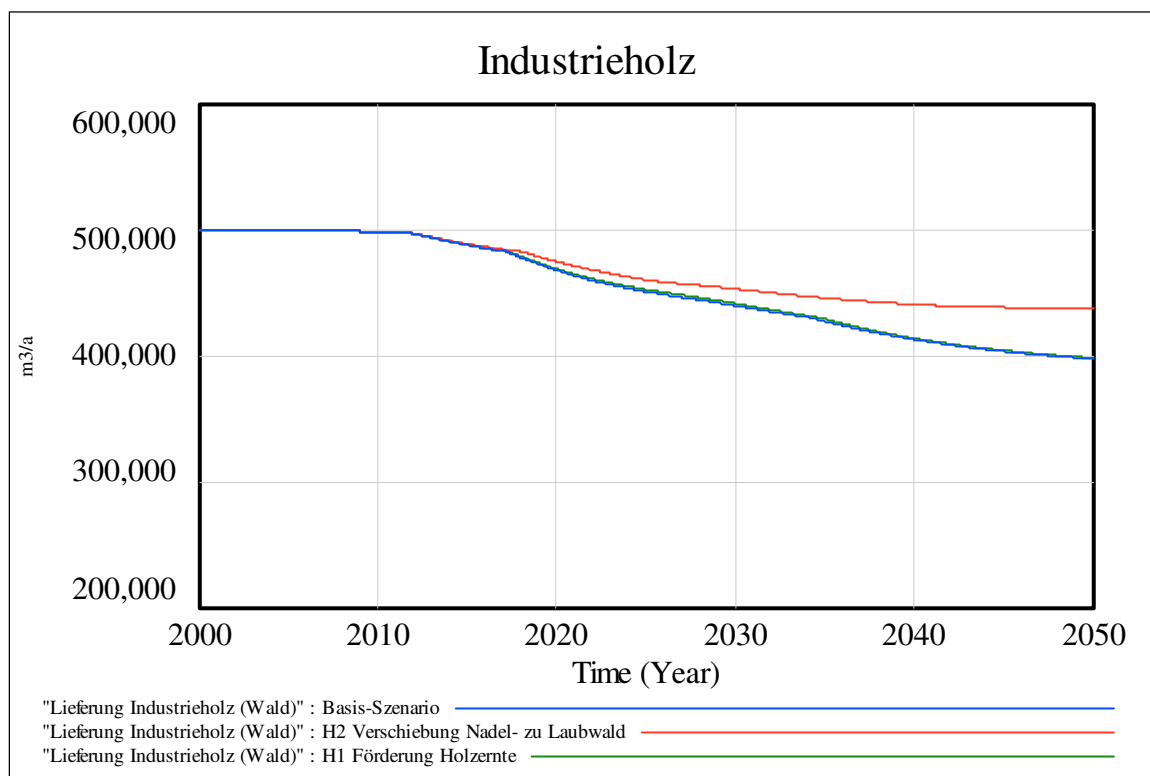


Abbildung 17: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Verfügbarkeit von Industrieholz.

8.4. Die Handlungsoptionen in einem veränderten Umfeld

Wie bereits in Abschnitt 7 gezeigt wurde, geht von der Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Ausland eine grosse Wirkung aus (Extremszenario E1 Hohe Wirtschaftlichkeit des Säge-Rohholzes in der Schweiz). Die hier als Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008) bezeichnete Situation geht von einem Rückgang der Wirtschaftlichkeit gegenüber dem Ausland von 20% in 2008 aus. Im Vergleich zum Basis-Szenario ergibt sich im Modell ein Rückgang beim Einschnitt in den Schweizer Sägereien von knapp 10% (Abbildung 18). Gemäss Jahrbuch 2012 gingen die Mengen beim Rohholzeinschnitt zwischen 2008 und 2011 um rund 10 % zurück. Die im Modell ausgewiesenen Auswirkungen dürften daher in der richtigen

²¹ Diese Aussage trifft im Grundsatz auch zu, wenn ein längerer Zeithorizont in Betracht gezogen wird.

Grössenordnung liegen. Aufgrund der verringerten Nachfrage gehen die Preise für Stammholz zwischen 2008 und 2012 ebenfalls zurück, und zwar um knapp 10%.²²

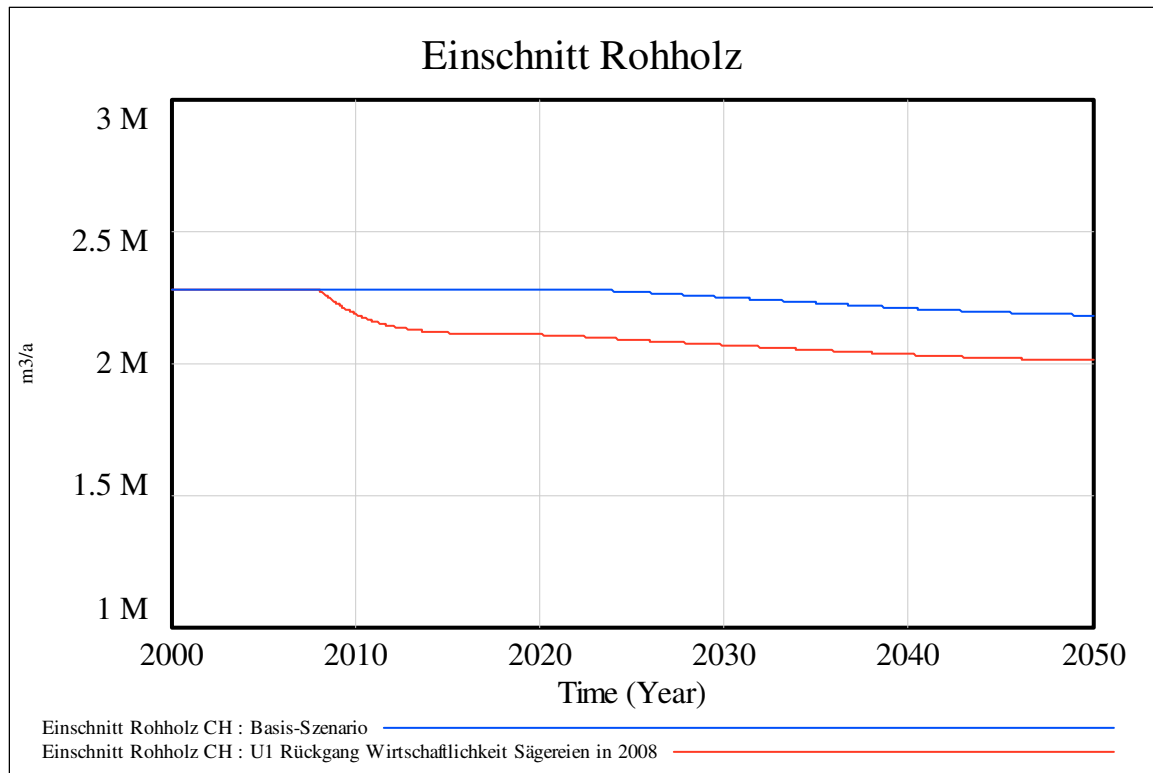


Abbildung 18: Einschnitt Rohholz Schweiz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008)

Handlungsoption H1 (Förderung Holzernte) führt auch im Fall einer geringeren Wirtschaftlichkeit der Sägereien gegenüber dem Ausland zu einer Zunahme bei der Holzernte und damit beim Stammholz, allerdings auf einem tieferen Niveau (Abbildung 19). Der Vergleich der vier Entwicklungen (Basis-Szenario, H1 Förderung Holzernte, Umfeld U1, H1 Förderung Holzernte im Umfeld U1) zeigt, dass die massgebliche Auswirkung dem veränderten Umfeld zuzuschreiben ist. Damit soll nicht gesagt werden, dass auf eine Förderung verzichtet werden soll. Hingegen sollte das veränderte Umfeld bei der Beurteilung der zu erwartenden Wirkung einer Förderung mitberücksichtigt werden.

²² Diese Abnahme ist in Übereinstimmung mit dem Rückgang des Holzpreisindex für Säge-Rundholz beim Nadelholz (Rückgang von 100% in 2008 auf rund 82% in 2012), wenn sie auch im Modell etwas langsamer ausfällt (Jahrbuch 2012).

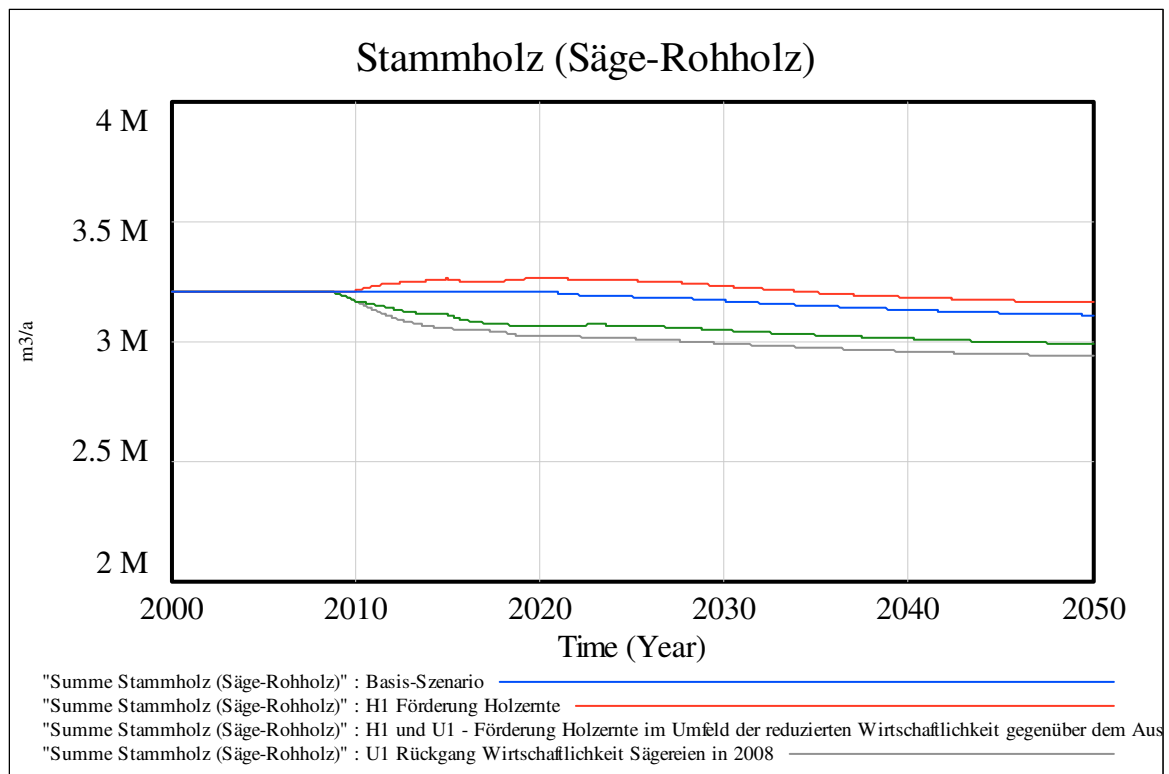


Abbildung 19: Auswirkungen einer Förderung der Holzernte auf die Nutzung von Stammholz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008).

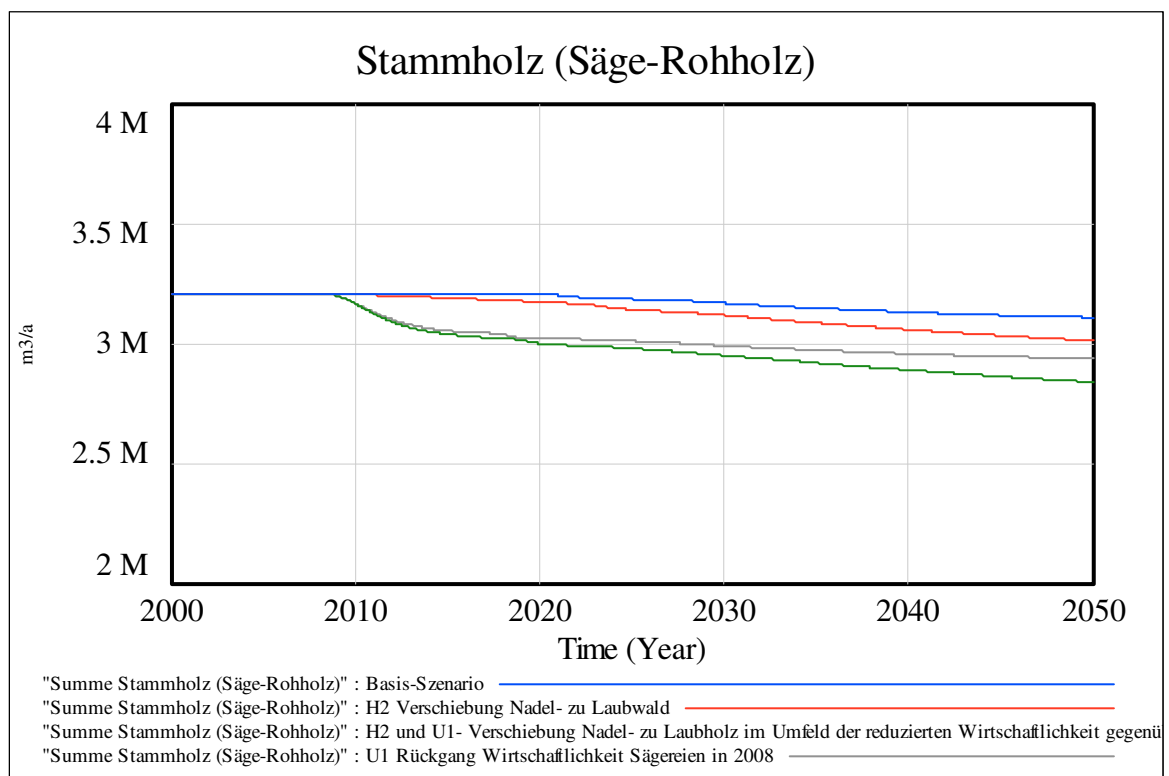


Abbildung 20: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald auf die Nutzung von Stammholz im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008).

Die oben gemachte Aussage über die Auswirkung einer verstärkten Förderung bei der Holzernte (Handlungsoption H1) trifft auch auf die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (Handlungsoption H2) zu. Auch hier übertragen sich die Auswirkungen im Umfeld U1 auf ein tieferes Niveau (Abbildung 20).

Das Umfeld U2 beschreibt eine Situation mit einem Anstieg der Preise für fossile Energie, im Gegensatz zum Extremszenario E2 allerdings einen moderateren Anstieg. Es wird in diesem Umfeld von einem Anstieg der Preise für fossile Energie von 50% bis 2030 ab 2010 ausgegangen (Wärmegestehungskosten). Die Analyse der Modellergebnisse zeigt jedoch, dass im Endeffekt in beiden Situationen die Konsequenzen vergleichbar sind. Stellvertretend werden hier die Auswirkungen auf die gesamte Holznutzung diskutiert. Sowohl das Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie) wie auch das Extremszenario E2 (Starker Anstieg Preise für fossile Energie) führen zu einer deutlichen Zunahme in der Holznutzung, wobei dieser Effekt im Extremszenario früher einsetzt und stärker ausgeprägt ist (Abbildung 21).

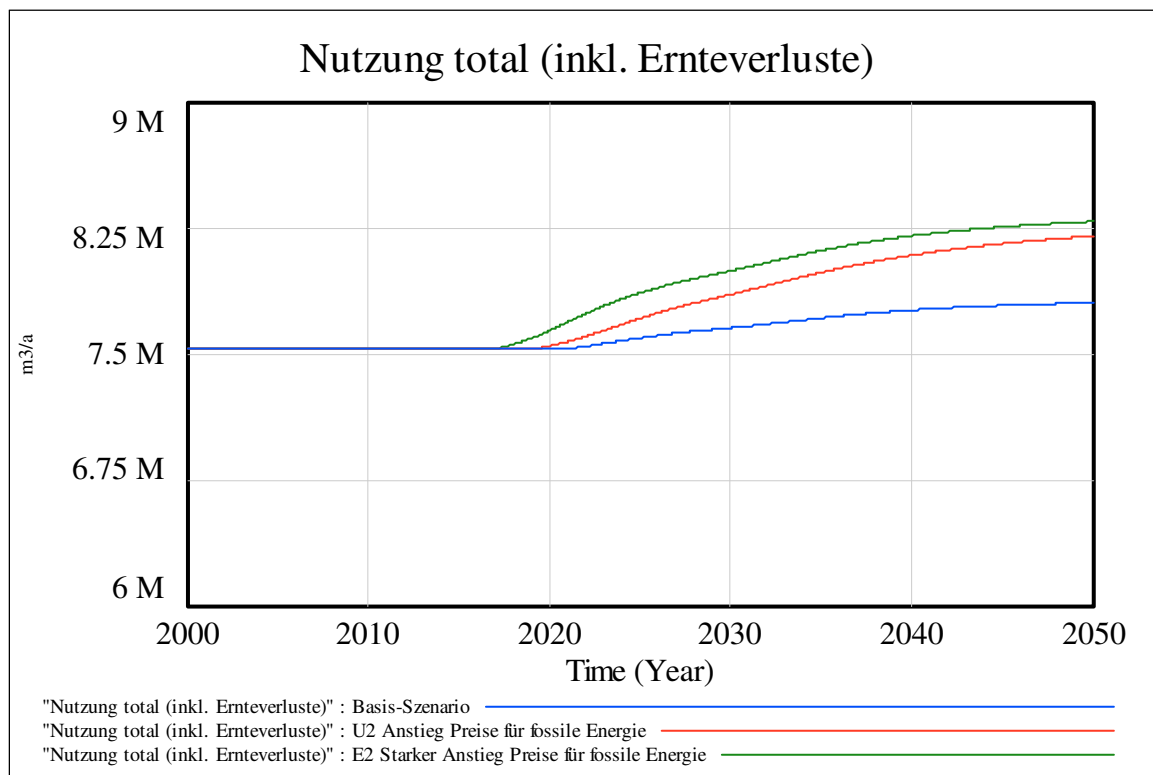


Abbildung 21: Gesamte Holznutzung (inkl. Ernteverluste) im Vergleich von Extremszenario E2 (starker Preisanstieg fossile Energie) und U2 (moderater Preisanstieg fossile Energie)

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass im Vergleich zum Basis-Szenario das Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008) insgesamt zu einer verringerten Holznutzung führt, während Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie) die Holznutzung erhöht. Dies wird in Abbildung 22 deutlich.

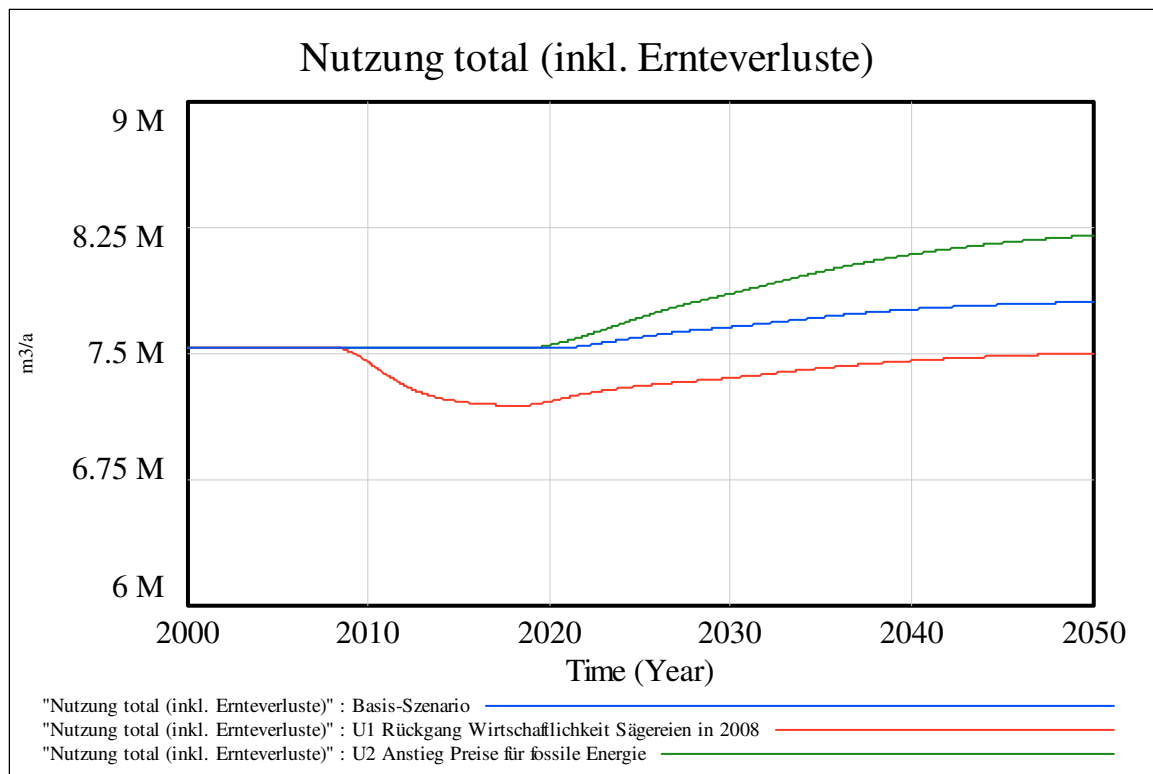


Abbildung 22: Holznutzung total im Vergleich von Basis-Szenario, Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien 2008) und Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie)

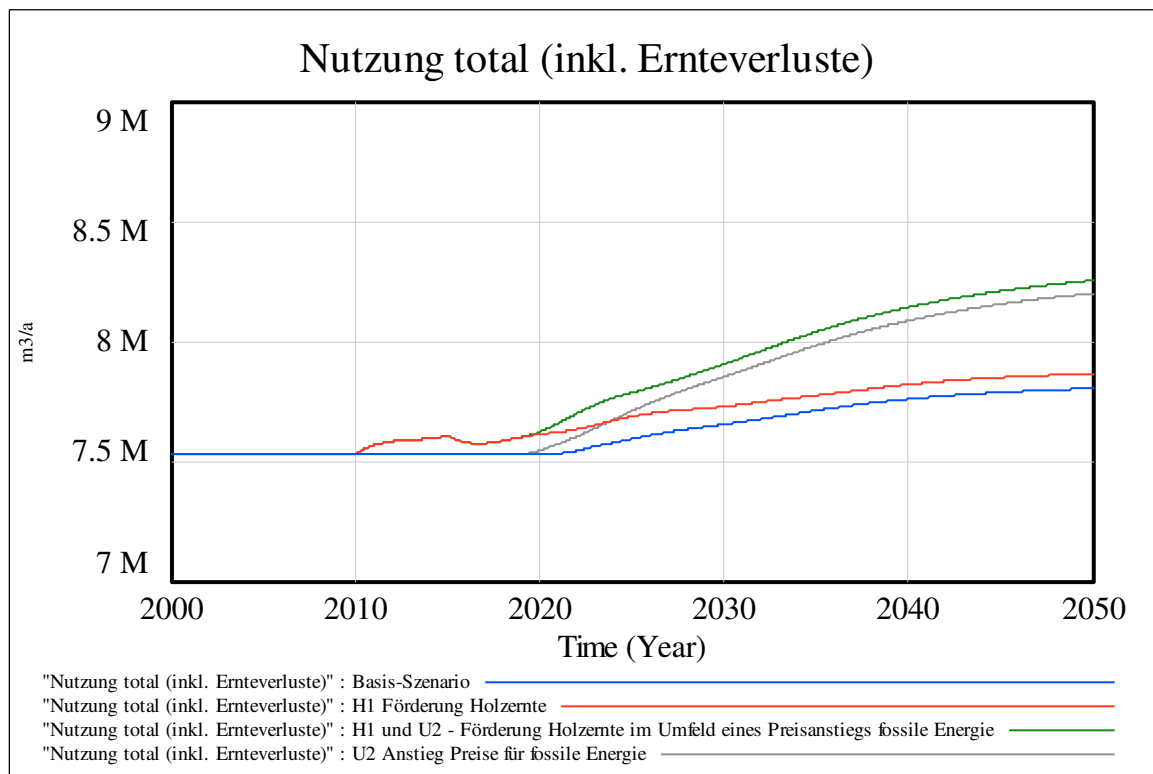


Abbildung 23: Gesamte Holznutzung (inkl. Ernteverluste) unter Berücksichtigung der Förderung der Holzernte (H1) im Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie)

Die Förderung der Holzernte führt auch im Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie) zu einer Zunahme der Holznutzung, wobei dies wie auch im Umfeld U1 (Rückgang Wirtschaftlichkeit Sägereien in 2008) auf einem deutlich unterschiedlichen Niveau stattfindet. In diesem Fall erhöht sich die gesamte Holznutzung aufgrund einer verstärkten Nachfrage nach Energieholz (Abbildung 23).

Die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (Handlungsoption H2) im Umfeld U2 (Anstieg Preise für fossile Energie) führt beim Stammholz wie erwartet zu einer stärkeren Reduktion, weil sich hier zwei Effekte kumulieren, die beide in die gleiche Richtung führen (Abbildung 24). Einerseits steht direkt weniger Stammholz zur Verfügung, andererseits ist zu erwarten, dass aufgrund einer steigenden Nachfrage nach Energieholz der Anteil von Stammholz noch weiter sinkt. Andererseits führt das knappe Angebot an Stammholz auch zu einem Preisanstieg beim Stammholz und dadurch zu einer verstärkten Holzernte.

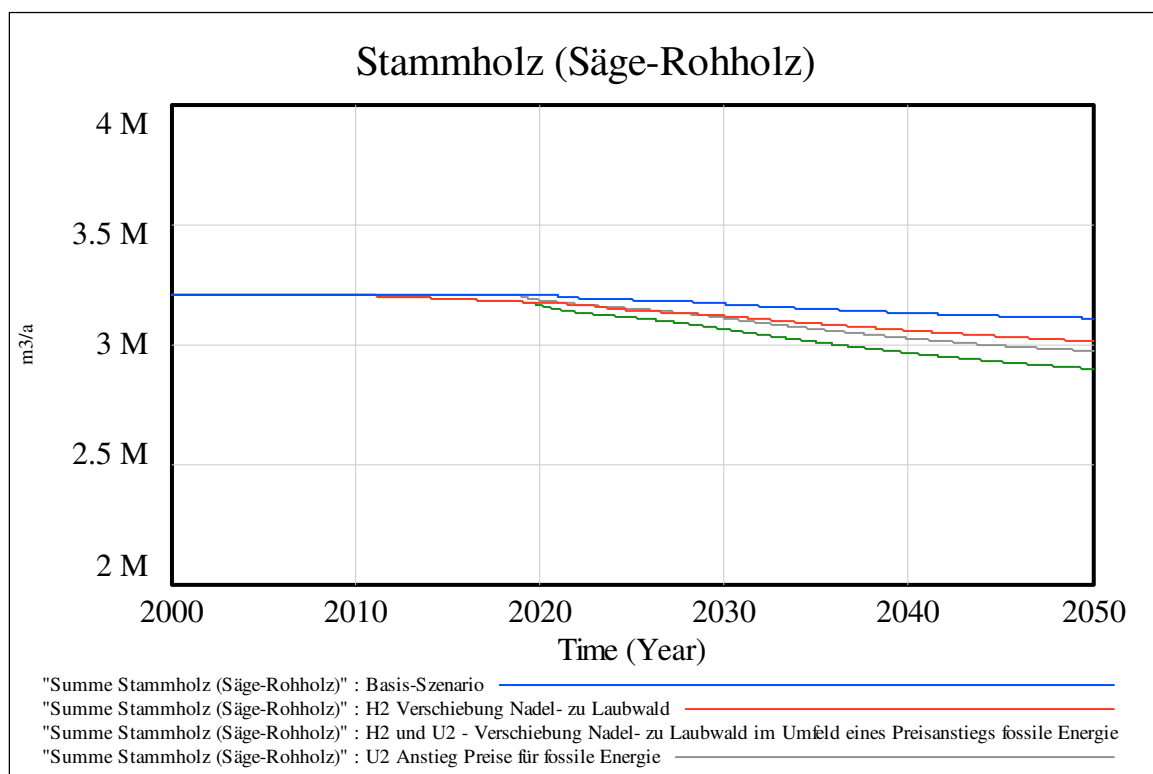


Abbildung 24: Summe Stammholz bei einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald H1 im Umfeld U2 (Preisanstieg fossile Energie).

Umgekehrt führt die grössere Verfügbarkeit von Laubholz und damit von Schwachholz zu einem grösseren Angebot an Energieholz und damit zu einer stärkeren Zunahme bei der Anzahl automatischer Anlagen. Beim Industrieholz führt der Preisanstieg bei der fossilen Energie (Umfeld U2) zu einer Abnahme infolge der gestiegenen Preise für Energieholz (vergleiche dazu auch Abbildung 17). Die Verschiebung hin zu mehr Laubholz kann diese Situation zu einem gewissen Grad entschärfen (Abbildung 25).

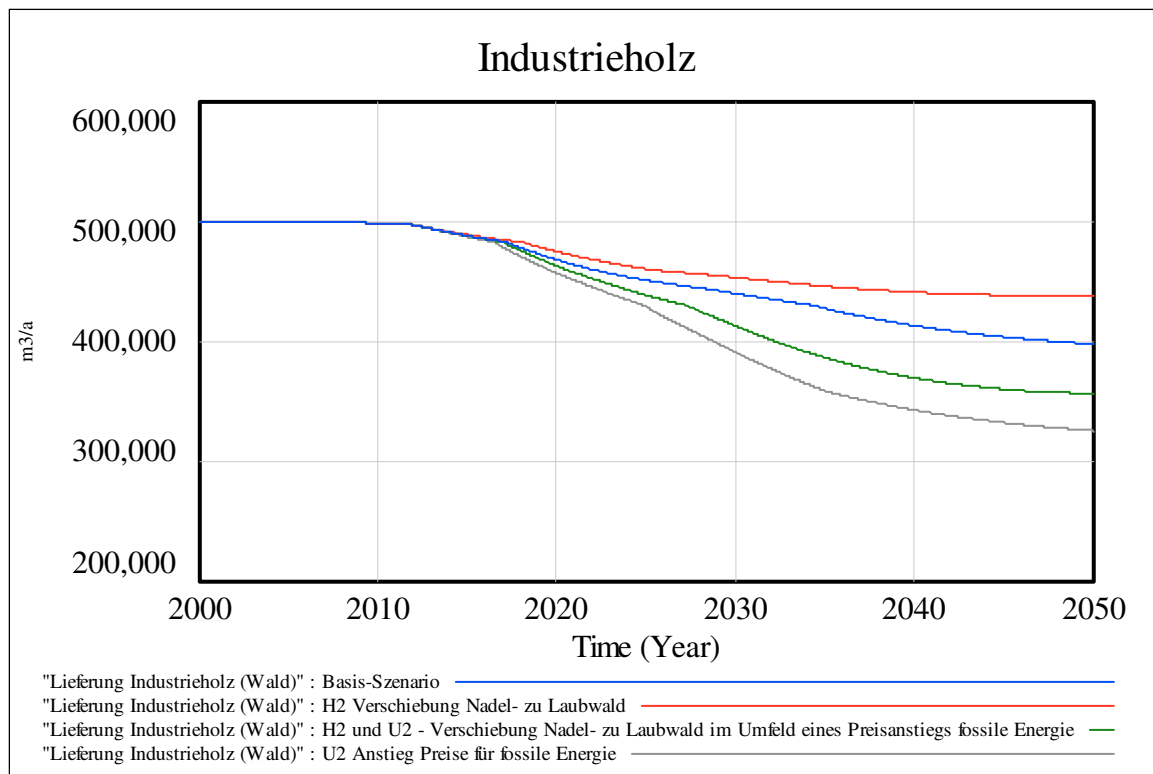


Abbildung 25: Auswirkungen einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (H2) auf die Verfügbarkeit von Industrieholz im Umfeld U2 (Preisanstieg fossile Energie)

8.5. Anteil stoffliche Nutzung

Der Anteil der stofflichen Nutzung (Stammholz, Industrieholz) an der gesamten Nutzung ist ein wichtiges Mass dafür wie sich die Holznutzung entwickelt. Der seit 1990 zu beobachtende leichte Trend zugunsten der nicht-stofflichen (energetischen) Nutzung setzt sich im Basis-Szenario aufgrund der steigenden Anzahl von Holzfeuerungsanlagen weiter fort. In diesem Szenario würde sich demnach der Anteil der stofflichen Nutzung von rund 60% (1990) auf rund 50% (2050) reduzieren. Dies trifft auch auf die beiden untersuchten Handlungsoptionen zu. Der Anstieg der Preise für fossile Energie dagegen würde den Anteil der stofflichen Nutzung auf ein Niveau von rund 45% weiter reduzieren.²³ Abbildung 26 zeigt den Anteil der stofflichen Nutzung für das Basis-Szenario und die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald (Handlungsoption H2), sowie den Einfluss eines Preisanstiegs bei der fossilen Energie (Umfeld U2).

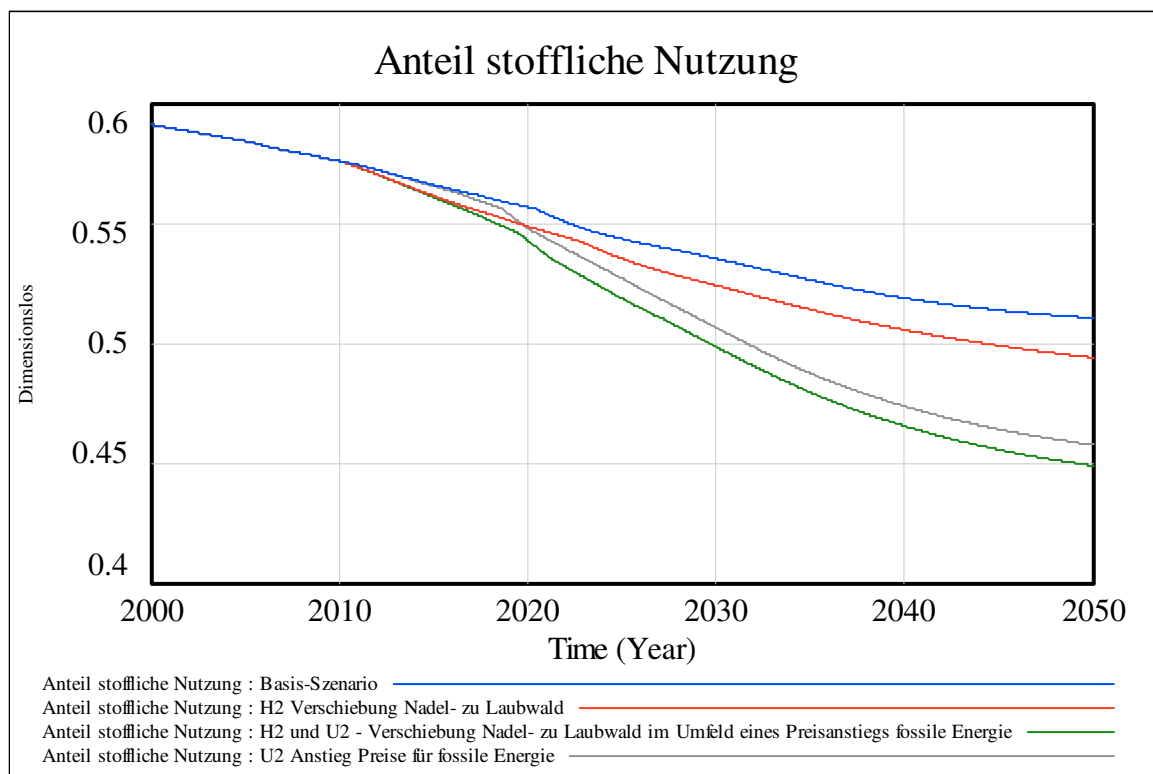


Abbildung 26: Anteil stoffliche Nutzung.

²³ Mit Ausnahme von H2 (Verschiebung Nadel- zu Laubwald) bleibt der Anteil der stofflichen Nutzung nach 2050 ungefähr auf dem gleichen Niveau. In H2 nimmt er von knapp 50% in 2050 weiterhin leicht ab (ca. 46% in 2100).

9. Kausalzusammenhänge und qualitatives Kausalmodell

Nachdem in den voranstehenden Abschnitten das Simulationsmodell erläutert und die Resultate diskutiert wurden, werden in diesem Abschnitt die wichtigsten Wirkungszusammenhänge und Rückkopplungen, die im Modell auftreten, zusammenfassend dargestellt. Dieses im Folgenden vorgestellte qualitative Kausalmodell entspricht in Bezug auf die Wirkungszusammenhänge dem vorher präsentierten Simulationsmodell. In diesem Sinn stellt das qualitative Kausalmodell eine Zusammenfassung des Simulationsmodells dar. Das qualitative Modell erlaubt eine übersichtliche Darstellung und Diskussion der Zusammenhänge und der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Wirkungsmechanismen. Es vermag im Gegensatz zum Simulationsmodell jedoch nicht zu beurteilen, wie sich diese gegenseitige Beeinflussung quantitativ auswirkt.

Im Folgenden werden mit Bezug auf Abbildung 27 - Abbildung 29 die wichtigsten Wirkungszusammenhänge erläutert.²⁴ Die Bezeichnungen in Klammern verweisen jeweils auf die in diesen Abbildungen ersichtlichen Feedback-Loops. Dabei wird unterschieden zwischen verstärkenden oder abschwächenden Rückkopplungen. Durch diese Analyse lassen sich bereits wertvolle Hinweise auf die Wirkungsweise der einzelnen Rückkopplungen bzw. Feedback-Loops gewinnen. In Abbildung 27 sind die abschwächenden („balancing“) Loops B1 bis B6 dargestellt, während in Abbildung 28 und Abbildung 29 die verstärkenden („reinforcing“) Loops hervorgehoben sind.

- Eine steigende Nachfrage nach Energieholz durch den Zubau von Holzenergieanlagen führt zu steigenden Preisen beim Energieholz. Dadurch wird der Zubau abgeschwächt, was sich aufgrund der langen Lebensdauer von Energieerzeugungsanlagen jedoch erst mit einer Verzögerung auf die Anzahl von Holzfeuerungsanlagen auswirkt. (B6).
- Steigende Preise für Energieholz führen zu einem grösseren Angebot an Energieholz zu Lasten des Stammholzes (B5) und zu Lasten des Industrieholzes (B4). Letzteres wird weiter verstärkt dadurch, dass aufgrund der höheren Verfügbarkeit von Energieholz mehr Holzfeuerungsanlagen erstellt werden (R1). Damit wird die Tatsache ausgedrückt, dass es

²⁴ Verwendete Terminologie im qualitativen Kausalmodell:

Der Einfluss einer Variablen A auf eine Variable B wird als „positiv“ bezeichnet, wenn eine Zunahme von A eine Zunahme von B bewirkt. Sie wird als „negativ“ bezeichnet, wenn eine Zunahme von A eine Abnahme von B bewirkt. Ein mit einem Doppelbalken gekennzeichnete Einflusspfeil bezeichnet eine verzögerte Wirkung. Unterstrichene Variablen stellen exogene Grössen dar, kursiv gedruckte Einflussgrössen entsprechen den Handlungsoptionen.

Eine geschlossene Wirkungskette (Rückkopplung, Feedback-Loop) wird als „balancing“ (B) bezeichnet, wenn eine anfängliche Zunahme einer Variablen aufgrund der Rückkopplung wieder ausgeglichen, bzw. abgeschwächt wird. Sie wird als „reinforcing“ (R) bezeichnet, wenn eine anfängliche Zunahme einer Variablen aufgrund der Rückkopplung verstärkt wird (vergleiche dazu auch die Lesehilfe zu Abbildung 27: Kausalmodell Holznutzung).

Die einzelnen Wirkungsketten und Zusammenhänge werden jeweils unter der Annahme betrachtet, dass die übrigen Variablen konstant bleiben.

neben dem Preis für Energieholz die Verfügbarkeit von Energieholz ist, welche zu einem verstärkten Ausbau der Holzfeuerungsanlagen führt.

- Das steigende Angebot beim Energieholz hat zwei Effekte zur Folge: Zum einen eine Reduktion des Energieholzpreises (B4) und zum anderen eine Zunahme bei den Holzfeuerungsanlagen. Dies führt dann zu einer längerfristig erhöhten Zunahme bei der Nachfrage und der Preise für Energieholz (B6), was wie bereits erwähnt dazu führt, dass das Wachstum bei den Holzenergieanlagen begrenzt wird.
- Höhere Preise für Energieholz führen aber auch dazu, dass ein geringerer Teil der Holzernte für Stammholz genutzt wird (bei gleichbleibender Holzernte), und daher insgesamt mehr Schwachholz (Energie- und Industrieholz) zur Verfügung steht. Davon kann auch das Industrieholz profitieren (R2). Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Preisdifferenz zwischen Energie- und Industrieholz nicht zu gross ist (B4). Die grössere Verfügbarkeit von Schwachholz führt zu einem weiteren Ausbau der Holzenergie und in der Folge zu einer grösseren Nachfrage nach Energieholz. Diese Zunahme bei der Nachfrage nach Energieholz verstärkt die anfängliche Preiszunahme beim Energieholz. Aus diesem Grund wird dieser Wirkungszusammenhang als „reinforcing“ bezeichnet.
- Der Export von Stammholz wirkt als „Ventil“ im Schweizer Markt für Stammholz und hat eine ausgleichende Wirkung auf den Preis Stammholz (B2). Bei sinkenden Preisen für Stammholz wird mehr exportiert, und umgekehrt.
- Auf der Nachfrageseite nach Stammholz ist die Kapazität der Sägereien massgeblich (bzw. die erwünschte Einschnittmenge), die wiederum von der Wirtschaftlichkeit der Sägereien abhängt. Diese Wirtschaftlichkeit wird hier massgeblich als internationale Konkurrenzfähigkeit verstanden. Diese steigt mit sinkenden Preisen von Stammholz und sinkt mit abnehmenden Exporterlösen (Preisen für Schnittholz Ausland). Auch hier führt eine anfängliche Erhöhung der Preise für Stammholz zu einem Rückgang bei der Nachfrage und einer Anpassung der Preise nach unten (B1).
- Im Modell können auch weiterreichende Feedback-Loops identifiziert werden (Abbildung 29). Steigende Preise beim Stammholz führen zu einer Vergrösserung der Holzernte insgesamt, und in Folge davon zu einem grösseren Angebot an Schwachholz (Koppelprodukt). Dies führt zu einem grösseren Angebot an Energieholz. In der Folge steigt die Anzahl von Holzfeuerungsanlagen (längerfristig) und damit die Nachfrage und die Preise von Energieholz. Dies führt dazu, dass der Anteil der Holzernte, der als Stammholz genutzt wird, abnimmt und in der Folge (anteilmässig) weniger Stammholz zur Verfügung steht. Dadurch wird die anfängliche Preiserhöhung beim Stammholz verstärkt (R3). Bei dieser Betrachtung wird unterstellt, dass der längerfristige Aspekt bei einer Erhöhung des Angebots an Energieholz gegenüber dem kurzfristigen Nachgeben beim Preis Energieholz überwiegt.

Die Analyse der Wirkungszusammenhänge macht verständlich, dass aufgrund der verschiedenen abschwächenden („balancing“) Loops auch grössere Veränderungen im System wieder „aufgefangen“ werden. Dies steht in Übereinstimmung mit den Resultaten des Simulationsmodells.

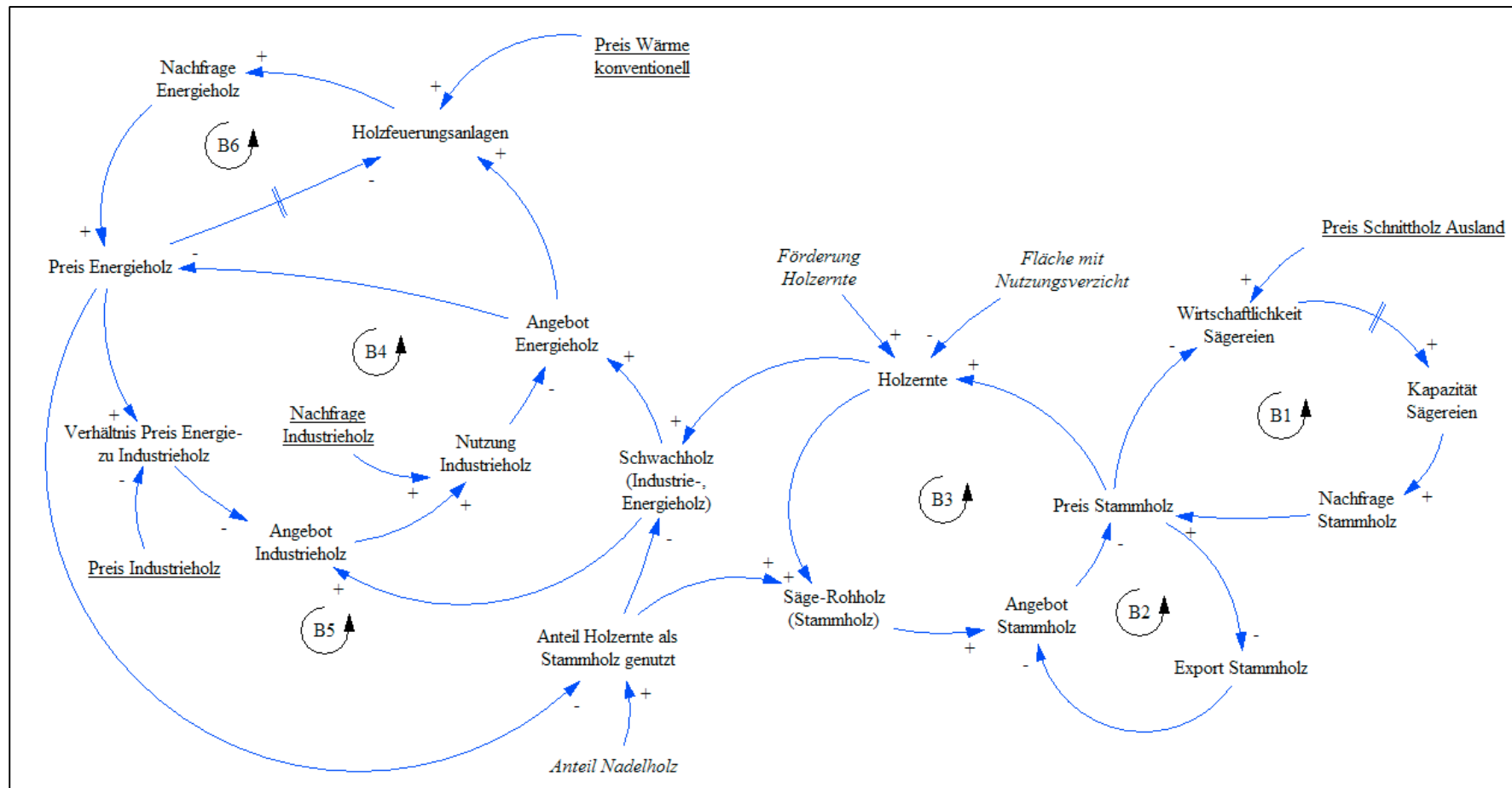


Abbildung 27: Kausalmodell Holznutzung mit den „balancing“ Loops B1 – B6.

Lesehilfe zum Feedback-Loop B1: Eine anfängliche Zunahme beim Preis Stammholz führt zu einer Abnahme der Wirtschaftlichkeit bzw. der internationalen Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Sägereien. Mit einer Verzögerung sinken in der Folge auch die Kapazität der Schweizer Sägereien und damit die Nachfrage nach Stammholz. Ein Rückgang der Nachfrage nach Stammholz hat einen Rückgang beim Preis Stammholz zur Folge. Die anfängliche Zunahme beim Preis Stammholz wird damit aufgrund der Rückkopplung wieder abgeschwächt. Aus diesem Grund wird diese Rückkopplung als „balancing“ (B) bezeichnet.

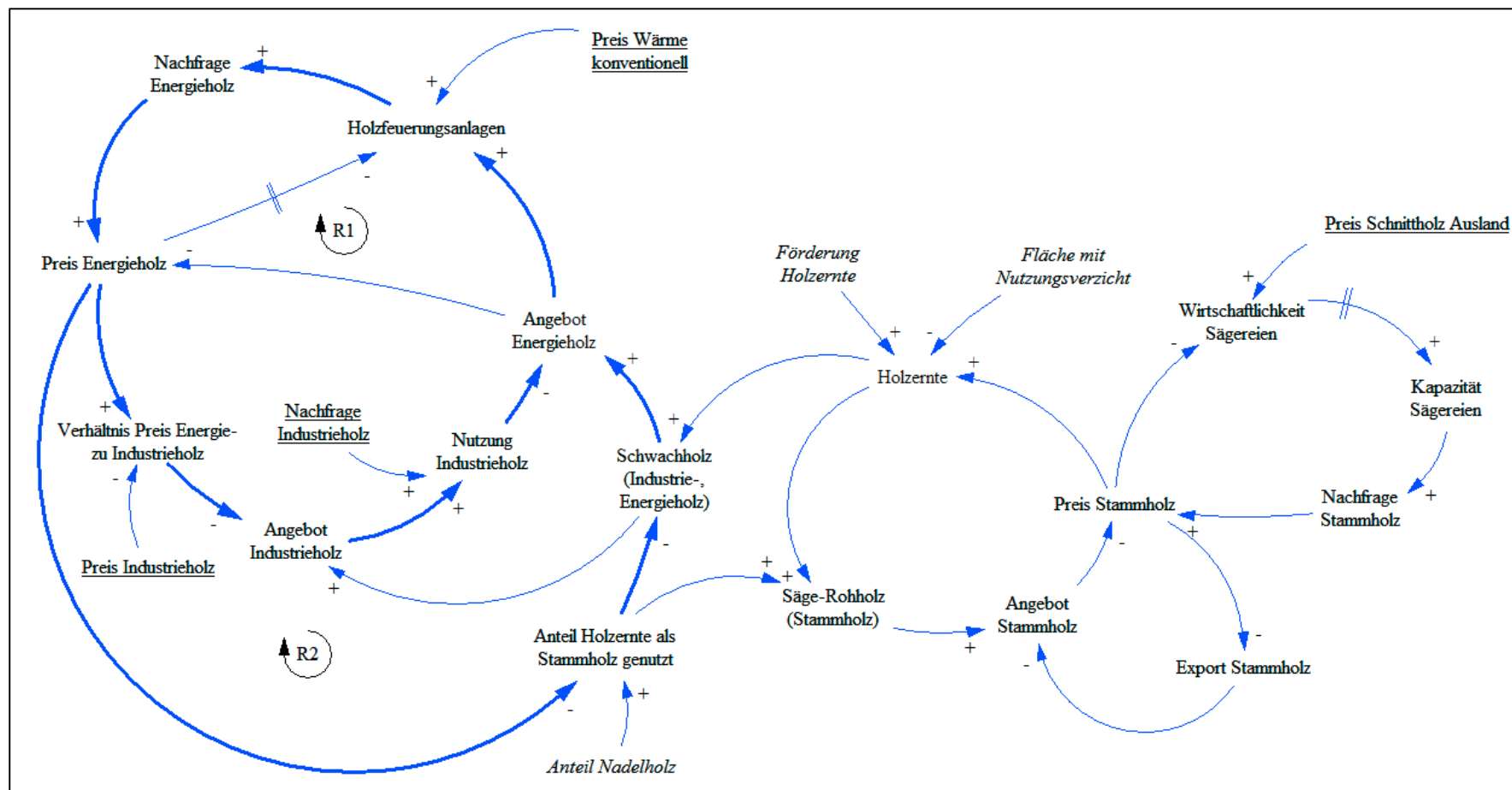


Abbildung 28: Kausalmodell Holznutzung mit den „reinforcing“ Loops R1, R2.

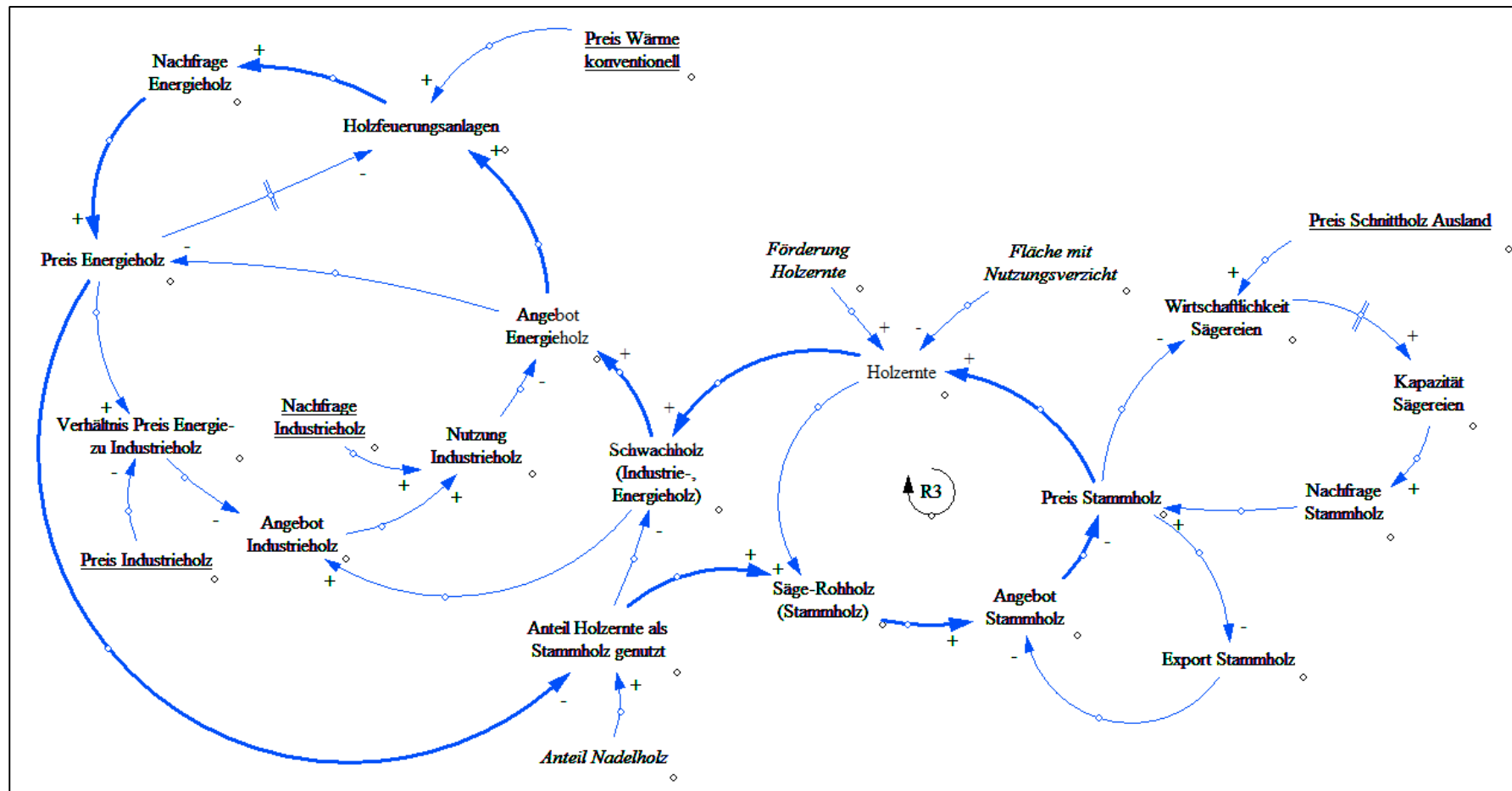


Abbildung 29: Kausalmodell Holznutzung mit einem weiterreichenden „reinforcing“ Loop R3.

10. Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden die Schlussfolgerungen formuliert, die sich aus der Analyse der Modellergebnisse ergeben. Dabei wird Bezug genommen auf die in Abschnitt 8 präsentierten Resultate des Simulationsmodells und auf das in Abschnitt 9 eingeführte qualitative Kausalmodell.

Förderung auf der Angebots- oder auf der Nachfrageseite?

Bei der Analyse der Modellresultate wurde bereits darauf hingewiesen, dass eine Förderung auf der Angebotsseite mit Massnahmen auf der Nachfrageseite verbunden werden sollte, um die aufgezeigten negativen Effekte auf den Holzpreis zu vermeiden (Abbildung 13, Abbildung 14). Die Förderung der Holzernte alleine auf der Angebotsseite (Förderbeiträge auf Flächen mit hohen Erntekosten) würde zwar die Holzernte insgesamt erhöhen, aufgrund des höheren Angebots aber auch zu einem tieferen Preis führen. Eine Förderung auf der Nachfrageseite (Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten) dagegen kann zu einer grösseren Holzernte führen, bei der im Grundsatz auch höhere Preise für Stammholz möglich sind. Dies gilt jedoch explizit nur unter der Voraussetzung dass durch diese Massnahme die Wirtschaftlichkeit der Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten erhalten bleibt oder im Idealfall sogar verbessert werden kann.

Dieser Sachverhalt kann auch im qualitativen Kausalmodell nachvollzogen werden (Abbildung 27, Abbildung 28). Die Förderung der Holzernte führt insgesamt zu einem grösseren Angebot an Holz, sowohl von Stamm- als auch von Schwachholz. Ihre Wirkung wird allerdings beschränkt durch sinkende Preise beim Stammholz aufgrund eines höheren Angebots (B3). Die sinkenden Preise beim Stammholz haben zur Folge, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Sägereien verbessert und damit die Nachfrage nach Stammholz wieder zunimmt (B1). In diesem Sinn kommt die Förderung auch der Sägerei-Industrie zu Gute, was durchaus mit der Zielsetzung einer verstärkten Holznutzung in der Schweiz übereinstimmt.

Verschiebung Nadel- zu Laubwald

Die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald lässt bis 2050 unter den hier getroffenen Annahmen keine fundamentalen Veränderungen erwarten, weder beim Stammholz, noch beim Schwachholz (Abbildung 15 - Abbildung 16, Abbildung 17). Einer leichten Abnahme beim Stammholz im Vergleich zum Basis-Szenario steht eine entsprechende Zunahme beim Schwachholz (Energie- und Industrieholz) gegenüber, ohne dass dadurch der Anteil der stofflichen Nutzung markant abnehmen würde (Abbildung 26).²⁵ Ein Grund dafür besteht darin, dass aufgrund eines steigenden Preises beim Stammholz die Ernte von Stammholz verstärkt wird. Es ist daher zu erwarten, dass sich durch eine Verschiebung von Nadel- zu Laubwald die Holznutzung insgesamt verstärken wird. Diese Entwicklung ist wie bereits mehrfach erwähnt nur dann zu erwarten, wenn der Preisanstieg beim Stammholz die Wirtschaftlichkeit bzw. internationale Konkurrenzfähigkeit der Schweizer Sägereien nicht gefährdet. In Bezug auf das Industrieholz ist die Verschiebung von Nadel- zu Laubwald positiv zu bewerten, weil mehr Holz zur Verfügung steht und der Preis für Energieholz tendenziell langsamer ansteigt.

²⁵ Diese Aussagen treffen im Grundsatz auch zu, wenn ein längerer Zeithorizont in Betracht gezogen wird.

Im qualitativen Kausalmodell (Abbildung 27, Abbildung 28) spielen bei einer Verschiebung von Nadel- zu Laubwald einerseits der Preismechanismus beim Stammholz (B3, B1) und andererseits die insgesamt höhere Verfügbarkeit von Schwachholz (B4, B5, B6, R1, R2) eine Rolle. Den beiden verstärkenden Feedback-Loops (R1, R2), welche das Schwachholz favorisieren, stehen drei abschwächende Feedback-Loops gegenüber, welche den Preis beim Energieholz und damit die Attraktivität beim Schwachholz auch wieder dämpfen.

Veränderungen im Umfeld haben grösseren Einfluss als die untersuchten Massnahmen

Die Analyse der beiden Handlungsoptionen in verschiedenen Umfeldern hat gezeigt, dass von der Veränderung der Umfeld der grössere Einfluss ausgeht, als von den Massnahmen bzw. Handlungsoptionen selber. Die angestrebte oder erwartete Wirkung der Massnahmen tritt zwar in jedem Fall ein, aber es ist das Umfeld, welches massgeblich bestimmt, auf welchem absoluten Niveau diese Veränderung vor sich geht (Abbildung 19, Abbildung 20). Umfeld U1 (Reduktion Wirtschaftlichkeit Schweizer Sägereien in 2008) führt gegenüber dem Basis-Szenario zu einer insgesamt verringerten Holznutzung, während in Umfeld U2 (Preisanstieg fossile Energie) die Holznutzung erhöht wird (Abbildung 22). Der Einfluss eines Umfelds ist daher bei der Beurteilung der zu erwartenden Wirkung einer Massnahme auf jeden Fall zu berücksichtigen.

Verstärkte energetische Nutzung

Eine verstärkte energetische Nutzung hat drei verschiedene Auswirkungen, die zu unterscheiden sind: eine Verschiebung innerhalb des Schwachholz-Sortiments, eine Vergrösserung des Anteils Schwachholz zu Lasten des Stammholzes, und eine Ausweitung der gesamten genutzten Holzmenge (Abbildung 21).²⁶ Bei gleichbleibender Gesamtmenge ist ein Zielkonflikt zwischen Energie- und Industrieholz zu erwarten, mit einem abnehmenden Anteil Industrieholz aufgrund des steigenden Verhältnisses beim Preis von Energie- zu Industrieholz. Entscheidend ist hier, inwiefern sich der Preis für Industrieholz dem verringerten Angebot anpassen kann. Diese Konkurrenzsituation wird bei einer Verschiebung in Richtung Laubwald deutlich entschärft, allerdings zu Lasten des Stammholzes (Abbildung 25). Steigende Preise für Energieholz führen zu einer Ausweitung des Angebots an Schwachholz zu Lasten des Stammholzes (Abbildung 24). Dabei ist zu beachten, dass diese Entwicklung aufgrund einer Zunahme bei den Preisen für Stammholz (je nach Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien) auch zu einer verstärkten Holzernte führen kann.²⁷ Beim Waldenergieholz, d.h. dem Segment mit dem grössten noch nicht genutzten Potenzial, ist bis circa 2035 eine Zunahme von heute rund

²⁶ In der in Abbildung 21 dargestellten Entwicklung wird keine explizite Förderung der energetischen Nutzung unterstellt. Es wird vielmehr untersucht, welche Auswirkungen von einem Umfeld ausgehen, in welchem die energetische Nutzung von Holz attraktiver wird (Preisanstieg fossile Energie).

²⁷ Das Potenzial für eine verstärkte energetische Holznutzung liegt einerseits beim Waldenergieholz und andererseits beim Altholz. Das Potenzial beim Restholz ist weitgehend ausgeschöpft. Eine verstärkte Nutzung von Altholz (insbesondere für grosse WKK-Anlagen) würde die Nachfrage nach Waldenergieholz und damit die Preise für Energieholz etwas verringern. Dies hätte zur Folge, dass die Anzahl von Holzfeuerungsanlagen leicht zunimmt, so dass insgesamt ein hoher Beitrag an die Energieproduktion durch Holz erreicht wird, ohne dass dies zu Lasten des Stammholzes, bzw. des Industrieholzes gehen würde. Bei dieser Option sind die lufthygienischen Anforderungen an eine Verbrennung von Altholz zu berücksichtigen. Diese Option kann im Modell prinzipiell untersucht werden, wurde hier aber nicht vertieft.

2. 2 Mio. m³/a (Keel 2012, Rutschmann 2012) auf rund 3.4 Mio. m³/a (Basis-Szenario) bzw. gut 4 Mio. m³/a (Umfeld mit Preisanstieg fossile Energie) zu erwarten. Damit wird das geschätzte Potenzial an Waldenergieholz von 3.1 Mio. m³/a (Rutschmann 2012) bzw. von 4.3 Mio. m³/a (Keel 2012) im Wesentlichen erreicht bzw. ausgeschöpft.

Diese Zusammenhänge werden im qualitativen Kausalmodell (Abbildung 27Abbildung 28) durch die Feedback-Loops mit Bezug auf das Schwachholz (B6, B5, B4, R1, R2), die Preisbildung beim Stammholz (B3) und die Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien bestimmt.

Vorratsentwicklung

Mit der im Modell unterstellten Basis-Entwicklung sowie in den untersuchten Extrem-Szenarien und Umfeldern nimmt der Vorrat weiterhin leicht zu (

Abbildung 9). Eine Vorratsabnahme und eine Stabilisierung auf einem tieferen Niveau sind daher erst zu erwarten, wenn entweder weitergehende Massnahmen ergriffen werden oder wenn sich die Rationalität in der Holznutzung grundlegend verändert. Zu solchen weitergehenden Massnahmen würden beispielsweise dauerhafte Veränderungen auf der Nachfrageseite gehören. Allerdings gilt hier die Einschränkung, die bereits in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der Sägereien auf den massgeblichen Absatzmärkten gemacht wurde.

Anteil stoffliche Nutzung

In Übereinstimmung mit der heute massgeblichen Rationalität in der Holznutzung hat im Modell die stoffliche Nutzung (Stammholz, Industrieholz) gegenüber der energetischen Nutzung grundsätzlich Priorität. Dies gilt allerdings nur solange die Preise für Energieholz nicht deutlich höher als diejenigen für Stammholz und Industrieholz liegen. Der seit 1990 zu beobachtende leichte Trend zugunsten der nicht-stofflichen (energetischen) Nutzung setzt sich im Basis-Szenario aufgrund der steigenden Anzahl von Holzfeuerungsanlagen weiter fort. In diesem Szenario würde sich demnach der Anteil der stofflichen Nutzung von rund 60% (1990) auf rund 50% (2050) reduzieren und etwa auf diesem Niveau verbleiben (Abbildung 26). Diese Aussage trifft auch auf die beiden untersuchten Handlungsoptionen zu. Der Anstieg der Preise für fossile Energie dagegen würde den Anteil der stofflichen Nutzung auf ein Niveau von rund 45% weiter reduzieren.

11. Diskussion

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Modellansatz entwickelt, der es erlaubt verschiedene Holznutzungsszenarien auf einer relativ stark aggregierten Ebene zu untersuchen. Im Simulationsmodell sind fünf Module miteinander verbunden, so dass die gegenseitigen Wechselwirkungen berücksichtigt und untersucht werden können. Die Module sind beschrieben in Abschnitt 5 und die Wechselwirkungen sind mit Hilfe des qualitativen Kausalmodells erläutert in Abschnitt 9. Der gewählte Modellierungsansatz (System Dynamics) erlaubt die dynamische Verknüpfung der verschiedenen Module und ermöglicht den realitätsnahen Bezug zu einzelnen Wirkungszusammenhängen. Mit dem qualitativen Kausalmodell wurde die Möglichkeit geschaffen, die komplexen Wirkungszusammenhänge, die im Simulationsmodell berücksichtigt wurden, einfach darzustellen und die Wirkungsweise von Massnahmen zu erklären. Für die Weiterentwicklung des Modells kann darauf Bezug genommen werden und es kann eine transparente Diskussion darüber geführt werden, welche weiteren Aspekte untersucht werden sollten und welches die leitenden Fragestellungen dazu sind.

Das Modell ist so kalibriert, dass es mit den wesentlichen „Eckwerten“ der Schweizer Holznutzung 1990 – 2010 übereinstimmt. Dabei wurde Bezug genommen auf die verschiedenen massgeblichen Statistiken (Jahrbuch Holz, Forststatistik, LFI, Holzenergiestatistik). In dieser Hinsicht konnte eine konsistente Darstellung der vorhandenen Daten erreicht werden.

Für die Entwicklung des Simulationsmodells wurden verschiedene vereinfachende Annahmen getroffen, welche in Kapitel 5 zusammengefasst sind. Diese Annahmen umfassen einerseits Grössen, die exogen vorgegeben werden (bzw. konstant gehalten werden) und andererseits Annahmen über Wirkungsmechanismen, die vereinfacht berücksichtigt wurden. Die Validierung und die Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass das Modell grundsätzlich plausibel und robust ist. Die Sensitivitätsanalyse hat aber auch aufgezeigt, in welchen Bereichen eine weitergehende empirische Abstützung notwendig wäre, insbesondere in Bezug auf einzelne Einflussfunktionen. Dazu sind jedoch präzisierende und stärker fokussierte Fragestellungen notwendig. In diesem Sinn konnte das hier präsentierte Modell aufzeigen, wo eine solche Präzisierung bzw. Fokussierung vorgenommen werden sollte.

Durch die Modellentwicklung konnte transparent gemacht werden, welches die massgeblichen Wirkungsmechanismen sind, die zu den hier dargestellten Ergebnissen führen. Sie hat aber auch klar gemacht, welche Wirkungsmechanismen nicht berücksichtigt wurden. Auf diesen Aspekt wird im nächsten Abschnitt unter „Weiterentwicklung“ eingegangen.

Entgegen der ursprünglichen Absicht, ein Modell für die Holznutzung im Kanton Luzern zu entwickeln, wurde der geografische Horizont auf die Ebene Schweiz ausgedehnt. Der Grund dafür liegt darin, dass die Kantons Grenzen keine sinnvolle Abgrenzung darstellen und die Daten im Wesentlichen auf der Ebene Schweiz vorliegen. In einem ähnlichen Sinn wurde eine inhaltliche Abgrenzung vorgenommen. Die Untersuchung beschränkt sich auf Holzvorrat, Holzernte und die erste Verarbeitungsstufe. Die Stoffflüsse bei der zweiten Verarbeitungsstufe sind zu stark grenzübergreifend, als dass sie in dieser Untersuchung sinnvoll hätten berücksichtigt werden können.

In Übereinstimmung mit der heute massgeblichen Rationalität in der Holznutzung hat im Modell die stoffliche Nutzung (Stammholz, Industrieholz) gegenüber der energetischen Nutzung grundsätzlich Priorität. In diesem Sinn ist im Modell eine Kaskadennutzung beim Holz enthalten,

und zwar in zweierlei Hinsicht: Zum ersten durch die Tatsache, dass die Holznutzung auf die Produktion von Nutzholz ausgerichtet ist und die Priorität daher auf der Produktion von Stammholz liegt. Zum anderen dadurch, dass beim Schwachholz die Priorität im Grundsatz bei der Verwertung als Industrieholz liegt, und erst in zweiter Priorität bei der Nutzung als Energieholz. Dies gilt allerdings nur solange als sich die Preise für Energieholz und Industrieholz nicht zu stark unterscheiden. Die Nutzung von Altholz, die Teil der Kaskadennutzung ist, wird durch die Beschränkung auf die erste Verarbeitungsstufe implizit als eine exogene Variable betrachtet.

Mit dem hier präsentierten Modell können die in den Projektzielen formulierten Handlungsoptionen in ihrer Wirkungsweise untersucht und diskutiert werden. Dabei hat sich gezeigt, dass das „System Holznutzung“ über eine gewisse „Selbstregulierung“ verfügt, welche verhindert, dass es zu sehr „auf eine Seite ausschlägt“. Wenn diese Aussage stimmt, dann deutet sie auch darauf hin, dass es für grössere und nachhaltige Veränderungen in der Holznutzung Schweiz die Berücksichtigung weiterer Wirkungszusammenhänge (wie z.B. die verstärkte Nutzung des Waldes für Energieholz) oder weitergehender Massnahmen (z.B. abgestimmte Massnahmen bei Angebot und Nachfrage nach Stammholz) braucht. Das Modell macht dabei deutlich, welche Annahmen und Wirkungszusammenhänge für diese „Selbstregulierung“ verantwortlich sind, und ermöglicht dadurch eine fundierte Diskussion dieses Sachverhalts.

Nicht untersucht werden kann die Wirkungsweise verschiedener Fördermechanismen im Detail. Insbesondere wurde hier nicht weiter vertieft, wie die verschiedenen Akteure auf eine Förderung reagieren. Weiter wurde der Beitrag zur CO₂-Reduktion nicht explizit ausgewiesen, weil hier weitergehende Annahmen über die zu substituierenden Energiesysteme notwendig wären, die nicht Teil dieses Projekts sind. Weiter wurden die wirtschaftlichen Auswirkungen (Kosten, Nutzen) nicht vertieft. Eine solche Vertiefung würde sinnvollerweise bei einer detaillierten Untersuchung abgestimmter Massnahmen bei Angebot und Nachfrage nach Stammholz vorgenommen.

12. Weiterentwicklung

Die Diskussion hat gezeigt, dass eine Weiterentwicklung des Modells in verschiedene Richtungen gehen kann: erstens die Aufhebung von einschränkenden Annahmen, zweitens die Vertiefung ausgewählter Fragestellungen oder Bereiche, und drittens die empirische Vertiefung einzelner Funktionszusammenhänge.

Zum ersten Typ gehört insbesondere die Erweiterung der Rationalität bei der Holznutzung (Verschiebung hin zu einer verstärkten Nutzung des Waldes aus energetischen Gründen) oder auch der Aufbau vermehrter Verarbeitungskapazitäten für Laubholz. Diese Fragestellungen betreffen das „System Holznutzung“ im weitesten Sinn und sind auf die Untersuchung von möglichen grundsätzlichen Veränderungen ausgerichtet. Die hier angewendete Methode könnte insbesondere für die Untersuchung solcher Systemveränderungen einen wertvollen Ansatz bieten. Weiter könnte auch die Annahme fallen gelassen werden wonach die Nachfrage nach Industrieholz exogen ist, und diese stattdessen abhängig gemacht werden vom Verhältnis zwischen dem Preis für Energie- und Industrieholz. Als Beispiel für eine solche Weiterentwicklung des Modells sind im qualitativen Kausalmodell in Abbildung 30 zusätzliche Wirkungszusammenhänge eingefügt, welche diese Entwicklungsschritte illustrieren.

Weiterentwicklungen im Sinne ausgewählter vertiefender Fragestellungen betreffen insbesondere die Auswirkungen einer abgestimmten Förderung auf der Angebots- und auf der Nachfrageseite. Auf der Angebotsseite betrifft dies einerseits eine detaillierte Berücksichtigung der Deckungsbeitragsberechnungen sowie die erwartete Reaktion der verschiedenen Akteure. Auf der Nachfrageseite geht es um eine detaillierte Modellierung der Kapazitäten, Auslastung und Wirtschaftlichkeit bei den Sägereien. Weiter wären die Auswirkungen einer Energieholznutzung zu untersuchen, die verstärkt auf die Kombination von Strom- und Wärmeproduktion ausgerichtet ist. Um solche Fragestellungen anzugehen, müssten einzelne Bereiche im Modell vertieft und weiter detailliert werden.

Die empirische Vertiefung einzelner Funktionszusammenhänge stellt eine Weiterentwicklung des Modells dar, die sich im Wesentlichen auf der bisherigen Detaillierungsstufe bewegt. Sie würde dazu dienen, die Validierung einzelner Aussagen noch weiter zu führen.

Eine Weiterentwicklung des Modells müsste jedenfalls in enger Zusammenarbeit mit den jeweiligen Akteuren aus den zu vertiefenden Bereichen erfolgen. Auf diese Weise kann einerseits eine Fokussierung der Fragestellung erreicht werden und andererseits kann sichergestellt werden, dass die erarbeiteten Resultate auch in die Entscheidungen der jeweiligen Entscheidungsträger einfließen können.

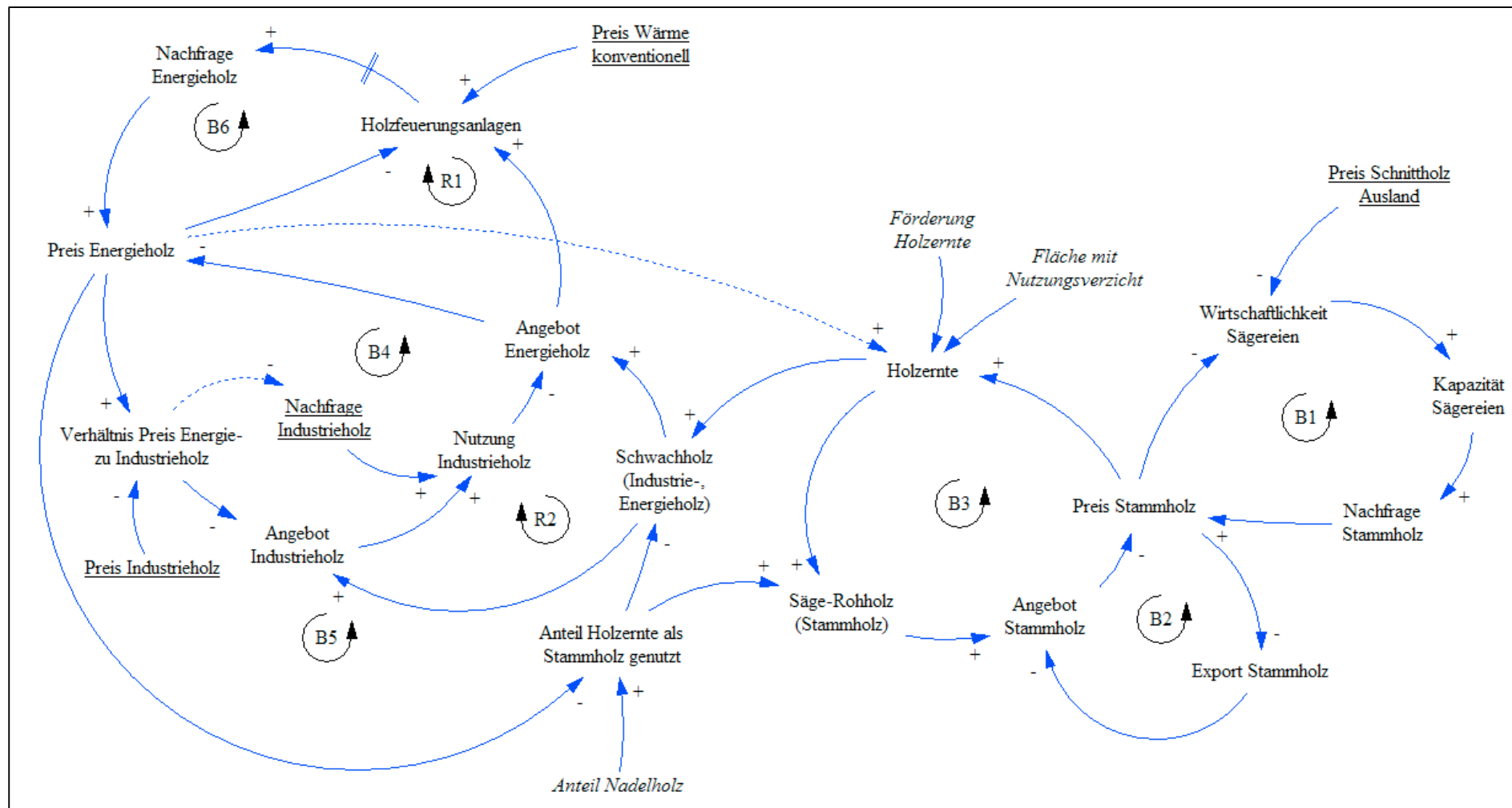


Abbildung 30: Weiterentwicklung des Modells. Die gestrichelten Pfeile geben an welche Wirkungszusammenhänge zusätzlich berücksichtigt werden könnten.

13.Literatur

Altwegg J., Schoop A., Hofer P. 2010. Differenzen Holznutzungsmenge zwischen Forststatistik und LFI.

BAFU. 2008. Ressourcenpolitik Holz.

<http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/10955.pdf> (20.12.13)

BAFU (Hrsg.) 2012: Jahrbuch Wald und Holz 2012. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU. (Hrsg.) 2012a. Forstwirtschaftliches Testbetriebsnetz der Schweiz: Ergebnisse der Jahre 2008 – 2010.

BFE. 2002. Positionspapier Holzenergie - Ziele und Prioritäten zur Nutzung des Energieträgers Holz für Forschung, Demonstration und Marktbearbeitung in der Schweiz.

http://www.bfe.admin.ch/forschungbiomasse/index.html?lang=de&dossier_id=02715 (20.12.13)

Brändli, U.-B. (Red.) 2010: Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Bern, Bundesamt für Umwelt, Bern (LFI Ergebnisbericht 2010).

Hofer P. et al. 2011: Holznutzungspotenziale im Schweizer Wald. Auswertung von Nutzungsszenarien und Waldwachstumsentwicklung. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Keel A. 2009. NRP im Kanton Luzern. Projekt „Luzern-Energie“. Teilprojekt „Potenziale erneuerbare Energien“ Holzenergie

Keel A. 2012. Machbarkeitsstudie Holzversorgung Holzheizkraftwerk Sisseln.

Manser R. 2010. Holzpotenzial der Schweiz und Entwicklungsstrategien aus Sicht des Bundes; in: 11. Holzenergie-Symposium, Zürich 2010, 23-35.

Nussbaumer T. 2013. Beitrag von Holz zur Energiewende. Trends und Rolle der Holzenergie in der schweizerischen Energiestrategie 2050. Holz-Zentralblatt 40/984-985.

Rutschmann F. 2012. Die Energiestrategie 2050 des Bundesrates und der Beitrag der Holzenergie. in: 12. Holzenergie-Symposium, Zürich 2012, 7-10.

Sterman J. Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. 2000. Boston, Mass. : Irwin/McGraw-Hill

14. Anhang

14.1. Modelldokumentation

Das Modell wird mit Bezug auf die in Kapitel 5 erläuterten Module dokumentiert unter Angabe der Parameter und funktionalen Zusammenhänge.

Modul 1: Vorratsentwicklung und Holznutzung

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Umtriebszeit N ²⁸	110	Jahr	Gemäss Kaufmann et al. (2011) haben die Umtriebszeiten einen Wert von ≥ 110 Jahren für einen Nadelholzanteil von $> 50\%$ mit Ausnahme von sehr stark wüchsigen Flächen (90 Jahre, 20% der Waldfläche).
Umtriebszeit L	150	Jahr	
Anteil Fläche mit Verzicht auf Nutzung (Referenzwert)	20	%	LFI Ergebnisbericht 2010, S. 154, Waldfläche nach Bewirtschaftungsintensität: Anteil Fläche ohne Bewirtschaftung. Dies beinhaltet den Verzicht auf Nutzung aufgrund von ökologischen wie auch aufgrund von wirtschaftlichen Aspekten. Gemäss A. Arnet (lawas) dürfte ein Wert von 20% für den Kanton Luzern ebenfalls zutreffen. Dazu kommen noch rund 17% der Flächen die "selten" bewirtschaftet werden. Höhere Werte als 20% wären also im Modell durchaus vertretbar.
Nutzungsrate Durchforstung Referenz	5.3	m ³ /ha/a	mittlere Nutzungsrate Stangenholz (4.5 m ³ /ha/a), schwaches Baumholz (4.7 m ³ /ha/a). Quelle: LFI
Vorrat pro ha starkes Baumholz N	560	m ³ /ha	Vorrat pro ha starkes Baumholz (LFI3 2010, S.98)
Anteil Fläche Wald mit hohen Erntekosten	25	%	Gemäss LFI (2010) liegen die Holzerntekosten auf insgesamt 75% der Flächen unter 100 CHF.
Anteil Laubholz im erntereifen Bestand	33	%	Anteil Laub im Bestand 2011 (Jahrbuch 2012, G 3.1, S.26)
Anteil Fläche Stangenwald, schwaches Baumholz	32	%	LFI ²⁹
Anteil Fläche Wald Durchforstung	60	%	Flächenanteil Stangenholz, schwach, mittel (LFI3 2010, S.97)
Anteil Fläche Wald L (1990)	35	%	Jahrbuch 2012
Fläche Wald total	1.212 Mio.	ha	Waldfläche gemäss LFI3 (LFI3 2010, S.32); ohne Gebüschwald

²⁸ N = Nadelholz, L = Laubholz

²⁹ LFI = Auswertungen aus der Online LFI-Datenbank

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Mortalitätsrate	15	%	In Bezug auf den Zuwachs

Modul 2: Holzsortimente

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Anteil starkes Baumholz N genutzt für Stammholz Referenz	65	%	gemäss mündlicher Aussage (Holzakteure) 60%. Andere Quellen (Thees) gehen von bis zu 70% aus. Hier wird der Wert von 65% verwendet (Mittelwert; Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Stoffflussmengen, Erntemengen an Stammholz).
Anteil mittleres Baumholz N genutzt für Stammholz Referenz	65	%	Annahme, dass auch mittleres Baumholz Nadel gleich wie starkes Baumholz verwendet wird (bestätigt).
Anteil schwaches Baumholz N genutzt für Stammholz Referenz	50	%	im Vergleich zu mittlerem und starkem Bh tieferer Wert (mündliche Mitteilung A. Arnet lawa).
Anteil starkes Baumholz L genutzt für Stammholz Referenz	15	%	gemäss mündlicher Aussage (Holzakteure).
Anteil mittleres Baumholz L genutzt für Stammholz Referenz	15	%	gemäss mündlicher Aussage (Holzakteure).
Anteil schwaches Baumholz L genutzt für Stammholz Referenz	15	%	gemäss mündlicher Aussage (Holzakteure). Annahme, dass der gleiche Wert verwendet werden kann für schwaches Bh wie für mittleres und starkes Bh.
Anteil Ernteverluste (im Bestand verbleibend)	10	%	LFI, lawa; meist wird mit 12% Ernteverlusten gerechnet.
Anteil Energie- und Industrieholz genutzt Referenz	80	%	Aktueller Anteil (2010) beträgt rund 77% (2.2 Mio. m3 Waldenergieholz + 0.5 Mio. m3 Industrieholz). Der Wert von 2.2 Mio. m3 (Keel 2012) liegt um rund 0.5 - 0.6 Mio. m3 höher als derjenige in der Forststatistik.

Modul 3: Energie- und Industrieholz

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Nachfrage Industrieholz (Wald)	500000	m ³ /a	Holzernte Industrieholz war seit 1992 ungefähr konstant 0.5 Mio. m ³ (Forststatistik, Jahrbuch Wald und Holz). Nachfrage wird in erster Näherung gleich Ernte gesetzt und bezieht sich daher nur auf die Nachfrage nach Industrieholz aus dem Wald.
Preis Industrieholz	20	CHF/Sm ³	Aus Preisliste Kronospan (2012); umgerechnet auf CHF/Sm ³

Modul 4: Nutzung und Verarbeitung Stammholz

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Durchschnitt Export Stammholz	930000	m ³ /Jahr	Durchschnitt 2003-2011: Netto-Ausfuhr beträgt rund 1 Mio. m ³ /a (hier wird ein Wert von 930'000 m ³ /a verwendet (Modellkalibrierung); Quelle: Jahrbuch 2012
Preiselastizität Stammholz	-0.3	Dimensionslos	Der Modellparameter erweist sich im Rahmen von Sensitivitätsanalysen als nicht stark sensitiv; mit Ausnahme von sehr kleinen Werten.
Anfangswert Preis Stammholz	90	CHF/m ³	Durchschnittswert 2007 – 2009 (Jahrbuch 2012)
Preis Rohholz für Wirtschaftlichkeit Sägereien CH	90	CHF/m ³	Entspricht Anfangswert für Preis Rohholz, bzw. Durchschnittswert 2007-2009.
Anteil Restholz aus Einschnitt Rohholz	40	%	Jahrbuch 2012
Kapazität Sägereien Schweiz Referenz	2.263 Mio.	m ³ /a	Gleichgewichtswert mit den Anfangsbedingungen für Preis Stammholz (90 CHF/m ³) und Export (930'000 m ³ /a).

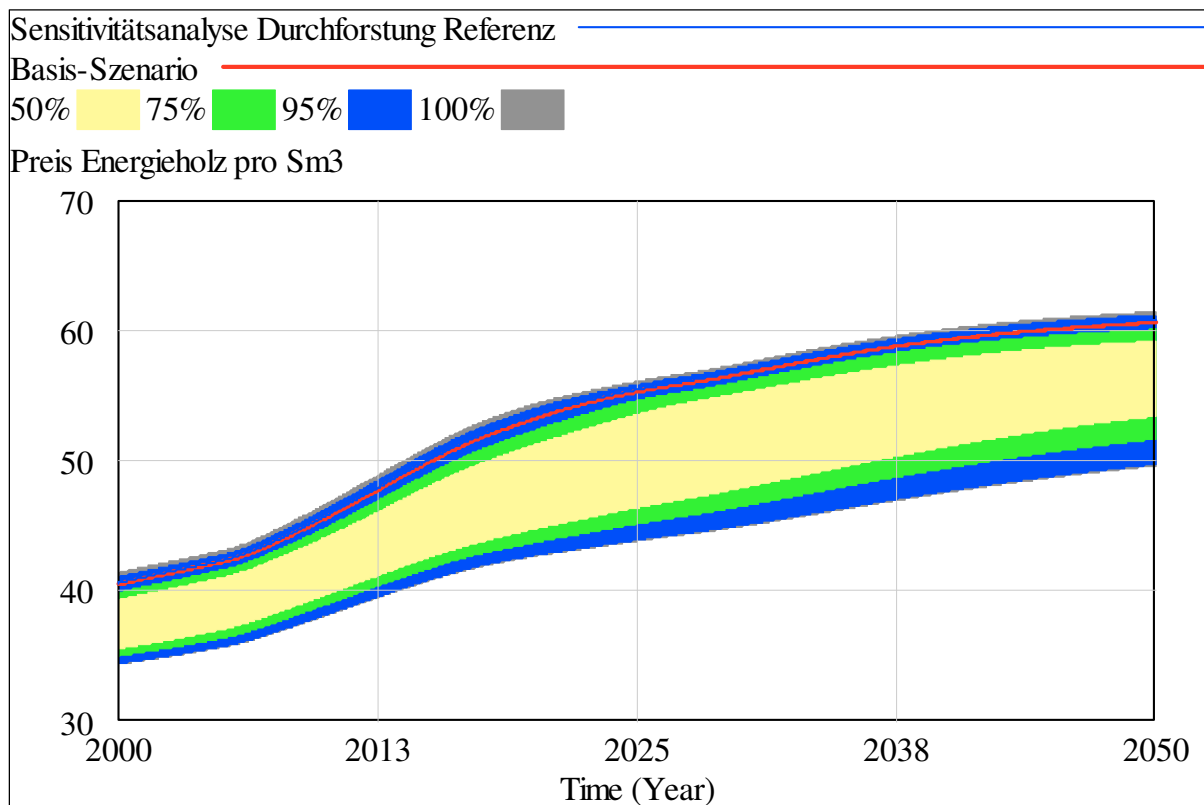
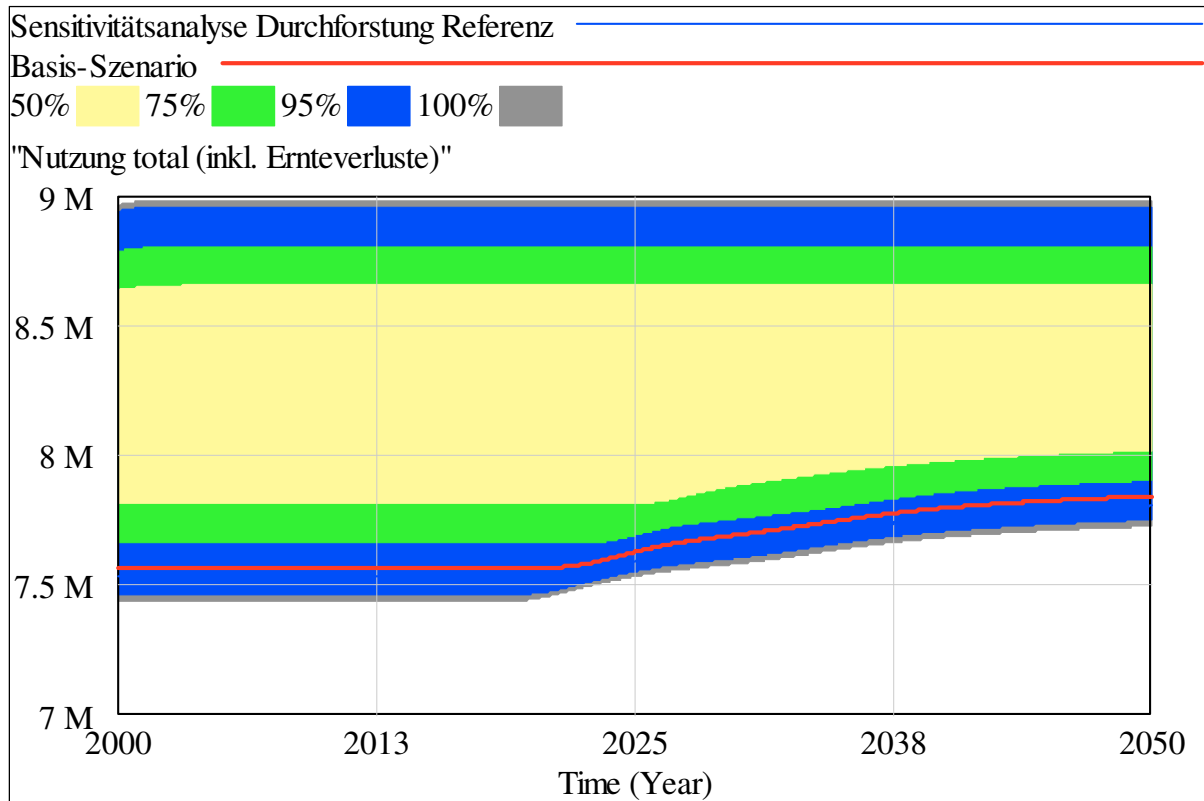
Modul 5: Energieholznutzung

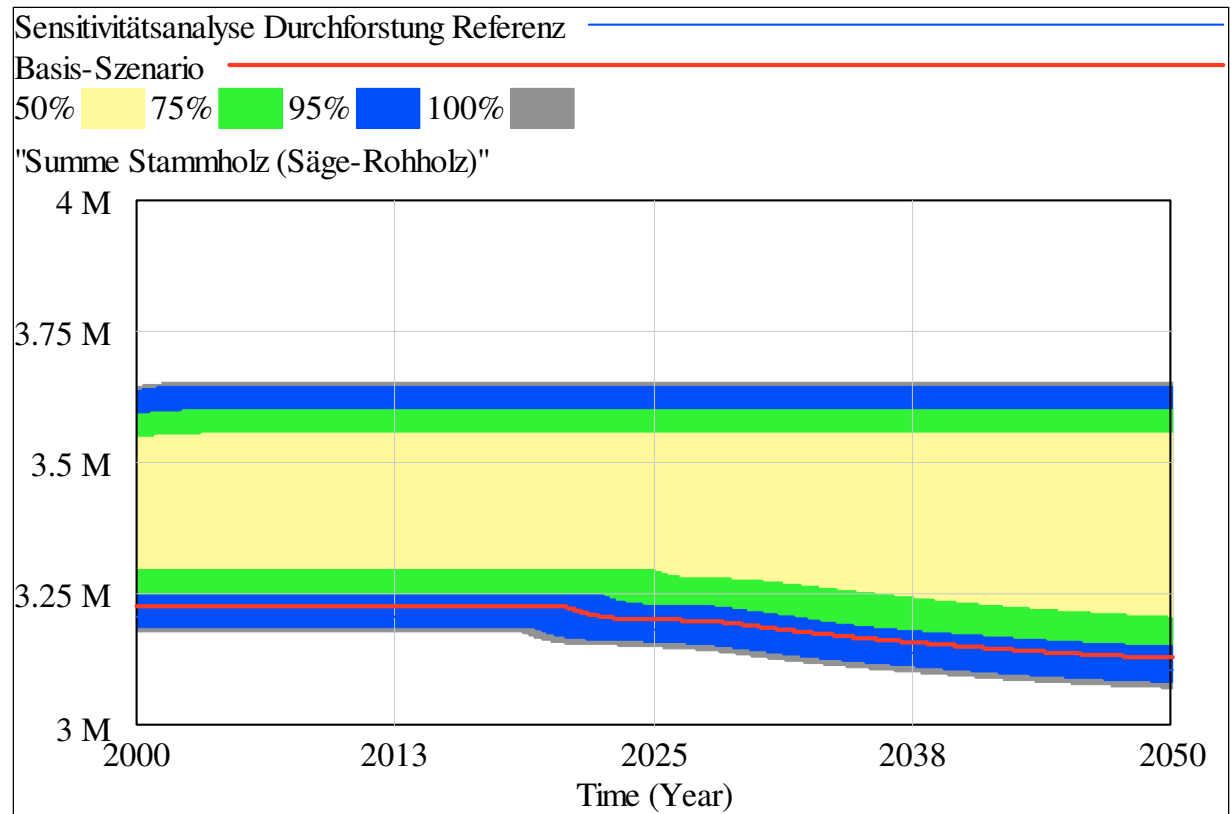
Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Anfangswert Preis Energieholz (1990)	35	CHF/Sm ³	Jahrbuch Wald und Holz 2012; Holzpreisindex Brennholz
Anfangswert Anlagen (1990)	2000	Anlagen	Anzahl automatische Anlagen 1990 (Holzenergiestatistik)
Diffusionskonstante Zubau automatische Holzfeuerungsanlagen	0.2	1/Jahr	Modellparameter (empirisch bestimmt, so dass Zuwachs Anlagen 1990 - 2010 bzw. Verbrauch Schnitzel mit historischen Daten übereinstimmt). Sensitivitätsanalyse durchgeführt mit Werten zwischen 0.15 und 0.25.
Energieinhalt pro Sm ³	750	kWh/Sm ³	Energiedichte für Waldholz (Nassschnitzel W50), in (Keel 2011).
Kosten Betrieb und Unterhalt automatische Anlagen	2	Rp/kWh	A.Keel
Kosten Investitionen automatische Anlagen	10	Rp/kWh	A.Keel
Lebensdauer automatische Anlagen	25	Jahr	A.Keel
Preiselastizität Energieholz (Waldhackschnitzel)	-0.3	Dimensionslos	Die relativ tiefe Preiselastizität widerspiegelt u.a. die Tatsache, dass nur ein geringer Teil des Energieholzes sich effektiv in einem Markt befindet (rund 75% langfristige Lieferverträge).

14.2. Grafiken zu Abschnitt 7.4 (Sensitivitätsanalyse)

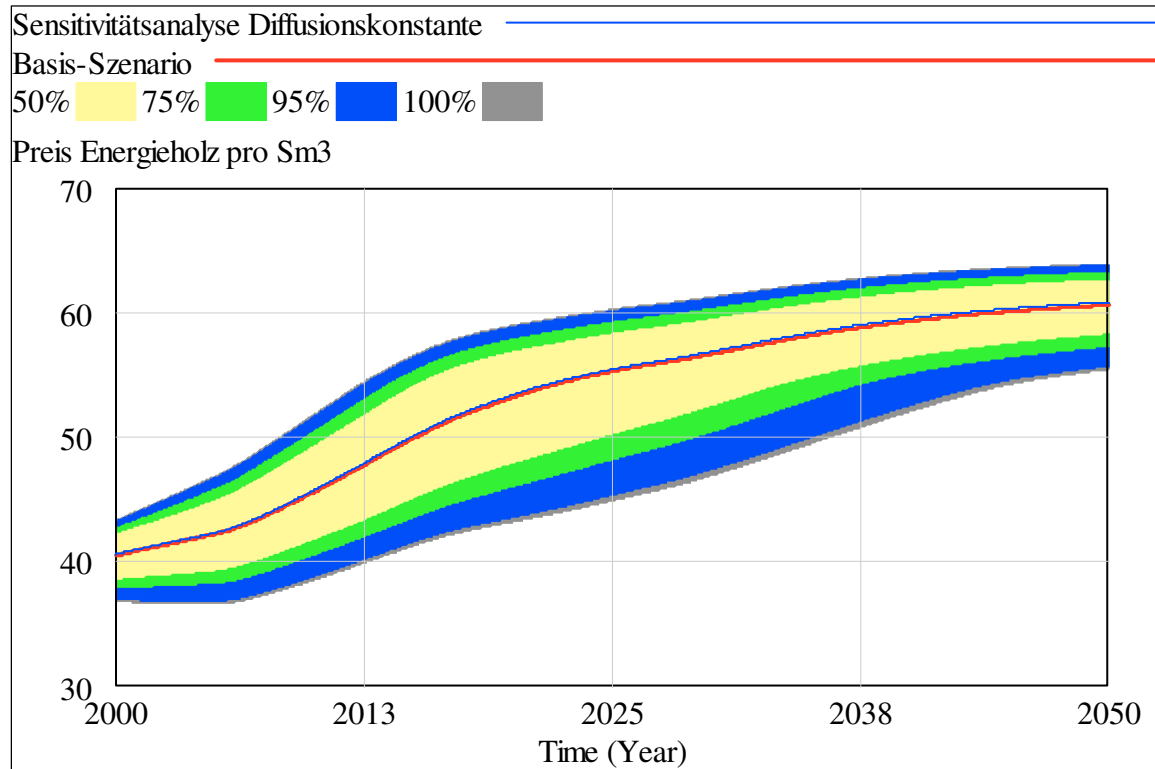
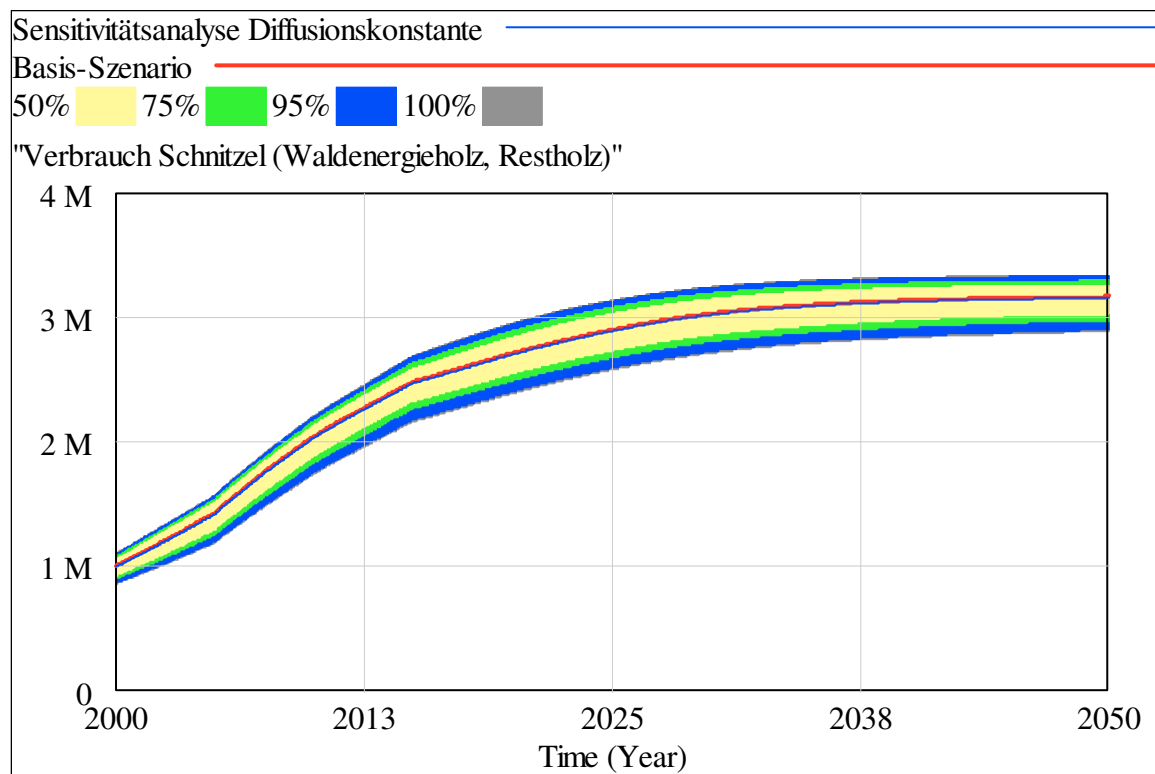
A) Variation von Parametern und Konstanten

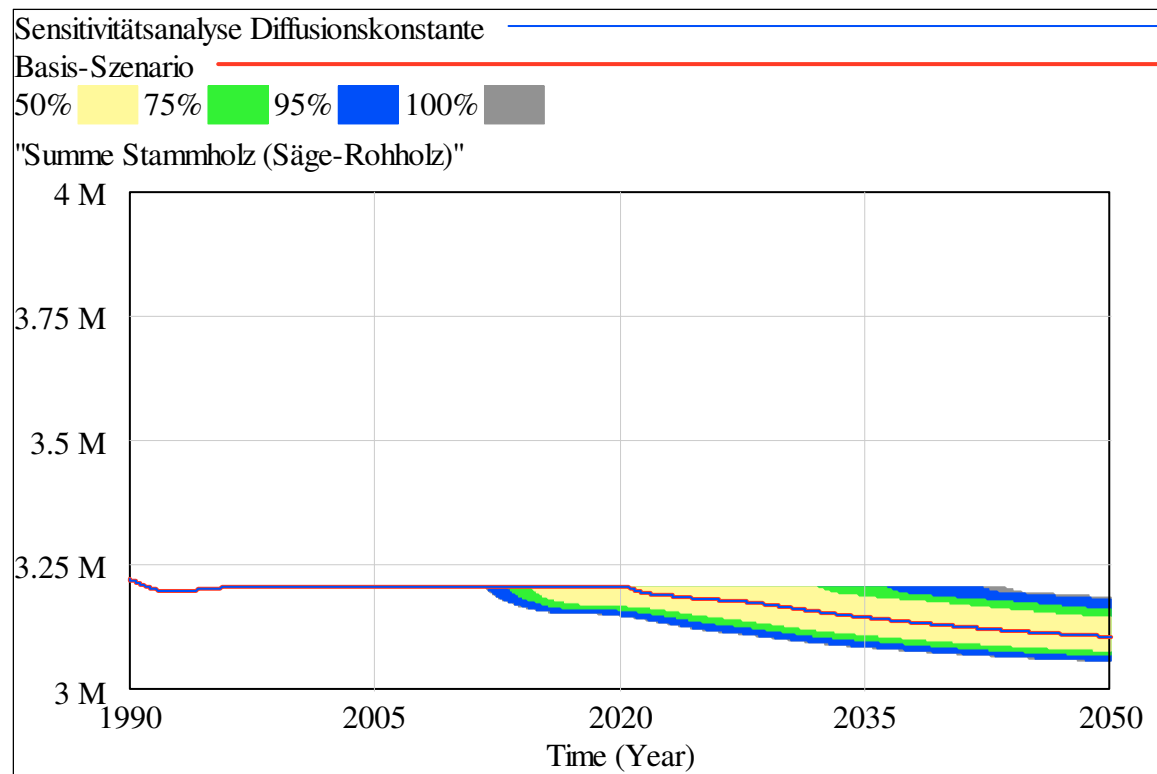
Variation Durchforstungsrate Referenz





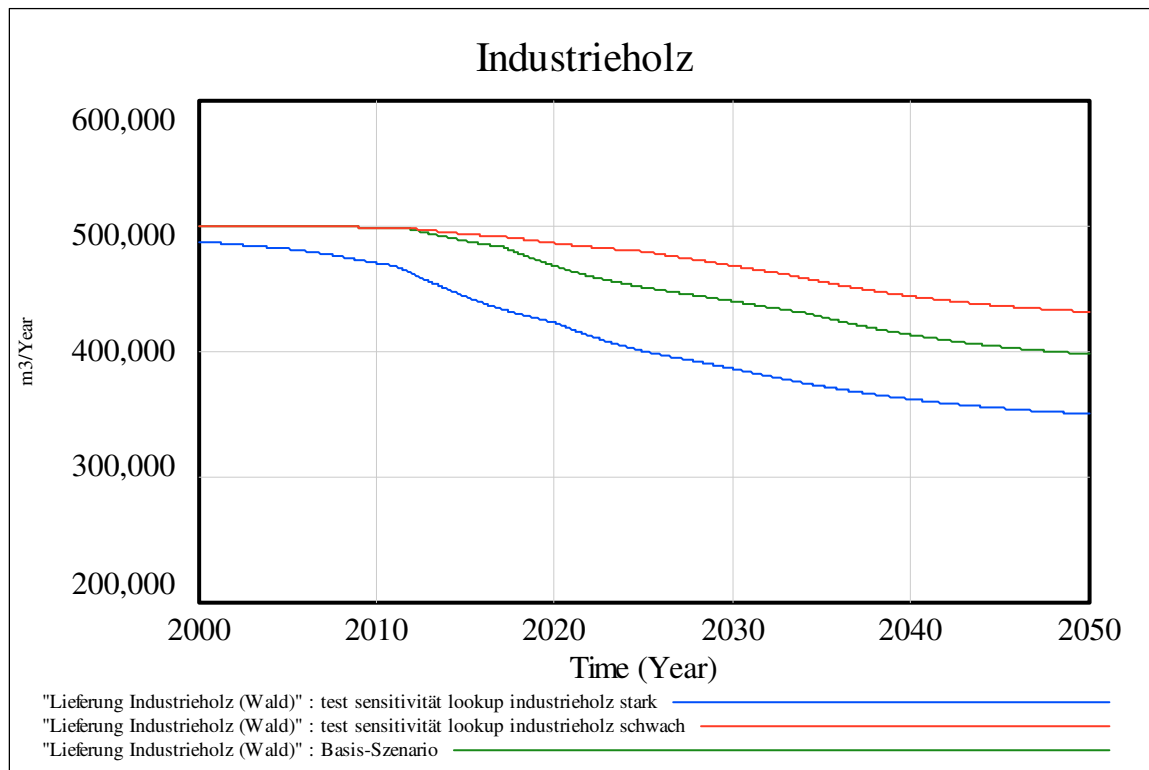
Variation Diffusionskonstante Zubau automatische Feuerungsanlagen



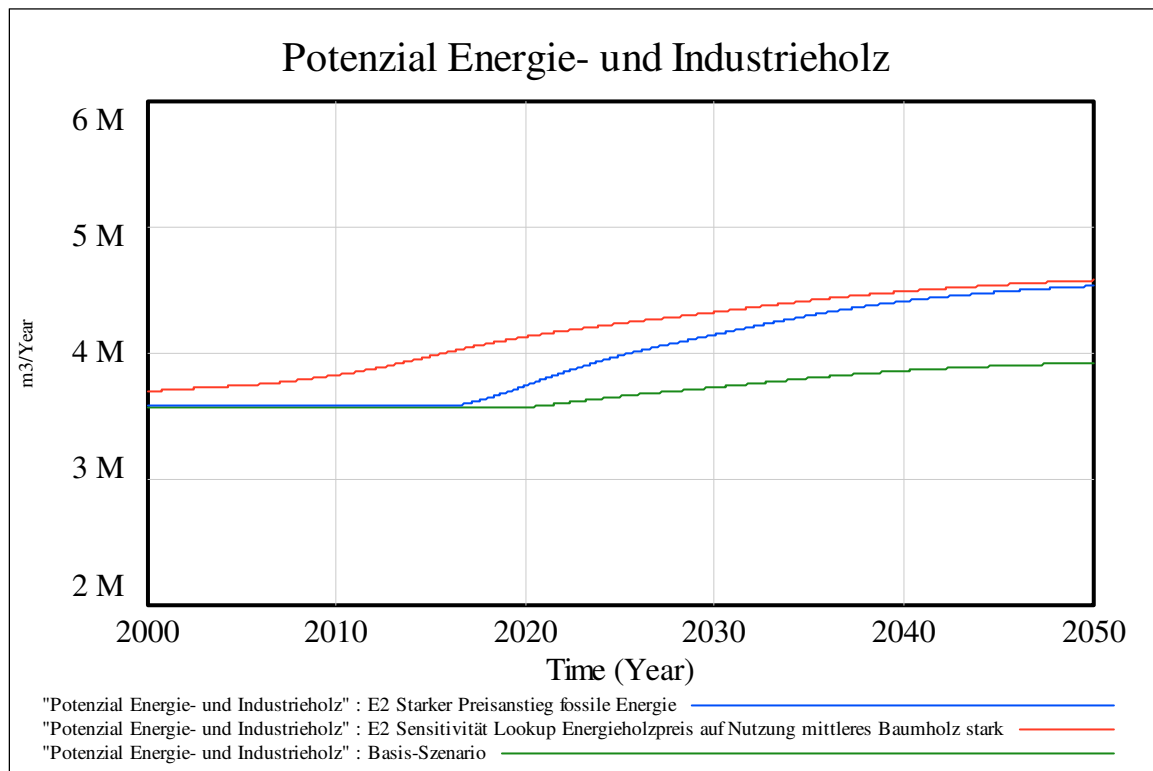


B) Variation funktionaler Zusammenhänge

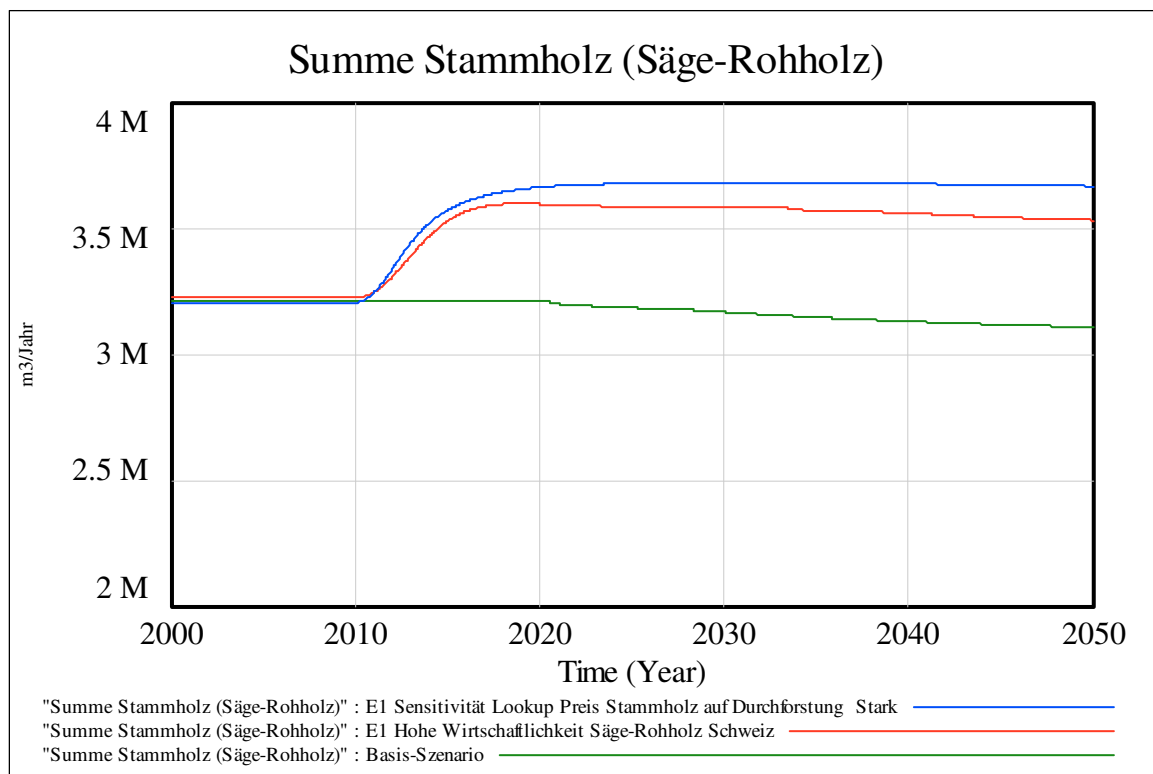
Aufteilung Energie- und Industrieholz in Abhängigkeit vom Preis Energieholz im Vergleich zum Industrieholz



Einfluss Energieholzpreis auf Nutzung des mittleren Baumholzes



Einfluss Stammholzpreis auf Durchforstungsrate



Einfluss Wirtschaftlichkeit Rohholz auf Kapazität Sägereien

